

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDSON JOSÉ JOAQUIM DE SOUZA

CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE CORRELAÇÕES EXPERIMENTAIS  
PARA A SIMULAÇÃO, CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE SPRAYS GERADOS EM  
ATOMIZADORES MECÂNICOS-CENTRÍFUGOS.

CURITIBA

2009

EDSON JOSÉ JOAQUIM DE SOUZA

CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE CORRELAÇÕES EXPERIMENTAIS  
PARA A SIMULAÇÃO, CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE SPRAYS GERADOS EM  
ATOMIZADORES MECÂNICOS-CENTRÍFUGOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia na ênfase Energia e Ciências Térmicas.

Orientadora: PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. Maria J.J. S. Ponte

CURITIBA

2009

## Ficha catalográfica

S729 Souza, Edson José Joaquim de.

Concepção e desenvolvimento de correlações experimentais para a simulação, controle e otimização de sprays gerados em atomizadores mecânicos-centrífugos / Edson José Joaquim de Souza. - Curitiba, 2009.

153 f.: il.; 29 cm.

Orientadora: Maria J. Ponte

Tese (Doutorado em Engenharia na Ênfase) – Universidade Federal do Paraná.

Bibliografia: f. 146-150.

1. Injetor. 2. Atomizador. 3. Injeção eletrônica. 4. Motor de combustão interna. 5. Atomização. I. Título. II. Universidade Federal do Paraná.

CDD 629.253

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

EDSON JOSÉ JOAQUIM DE SOUZA

CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE CORRELAÇÕES EXPERIMENTAIS  
PARA A SIMULAÇÃO, CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE SPRAYS GERADOS EM  
ATOMIZADORES MECÂNICOS-CENTRÍFUGOS.

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Engenharia na ênfase Energia e Ciências Térmicas da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria J. J. de S. Ponte  
Departamento de Pós Graduação em Engenharia (PIPE)

Curitiba, 7 de julho de 2009.

Para Carol, Felipe e Márcia que entenderam meu propósito e a ele me cederam, nobremente.

A professora Maria José Ponte pelo incentivo, além da grande orientação. A Petrobras-Six pelo apoio institucional na montagem das bancadas e finalmente ao Sr. João Batista (*in memoriam*) e Dna. Yale M. de Souza que me deram a base de tudo. Obrigado.

## RESUMO

Este trabalho trata do estudo de atomizadores mecânicos–centrífugos utilizados em sistemas de injeção eletrônica de combustíveis para motores de combustão interna. Foram estudados injetores para motores do tipo à centelha, que operam segundo o ciclo termodinâmico OTTO. Através de uma abordagem teórico-experimental estudou-se o fenômeno da atomização responsável pela geração do spray em injetores. O mecanismo de formação de sprays caracteriza-se pela turbulência, quebra das forças de tensão superficial, formação de filmes instáveis, ligamentos, gotas e finalmente gotículas. À luz da mecânica de fluidos aplicada e da observação dos fenômenos envolvidos em cada fase da atomização, buscaram-se correlações e modelos matemáticos de predição das principais características do spray, especialmente o diâmetro estatístico das gotículas e seu campo de velocidades. A disponibilização dessas ferramentas matemáticas é contribuição efetiva não somente à melhoria desses dispositivos, mas também à simulação da vaporização do líquido e formação da mistura carburada em motores. A literatura afirma a relação entre o desempenho do sistema de injeção com a economia de combustível e a redução de emissões poluentes. A abordagem se prima pela exploração da experimentação científica em que foram utilizadas técnicas qualitativas e quantitativas de medição do tamanho de gotículas e sua velocidade. Além de técnicas fotográficas sofisticadas como a de alta velocidade, empregaram-se métodos de medição ópticos avançados a raios Laser como a velocimetria por efeito Doppler (LDV) e medição do diâmetro por diferença de fase (PDPA). O planejamento de experimentos, bem como o tratamento de resultados, valeu-se do uso de métodos estatísticos de planejamento fatorial e regressão não-linear. Finalmente apresentam-se as correlações como ferramentas de engenharia para projeto e melhoria de injetores. Observou-se que nas correlações para o campo de velocidades os parâmetros adimensionais mais importantes são respectivamente os números de Euler, de Weber e Reynolds, nesta ordem. Finalmente apresenta-se uma análise da influência de cada parâmetro e a aplicabilidade das correlações propostas.

Palavras-chave: Injetor. Atomizador. Injeção eletrônica. Motor de combustão interna. Atomização.

## **ABSTRACT**

Among all modern human activities with impact on the environment the most important is the fuel based transportation. Regulatory guidelines for greenhouse gases "GHG" emissions and vehicle efficiency have come up in many countries after the Kyoto protocol agreement. Because of fuel availability, price rise and emission control the goal of having a more efficient engine has become a must worldwide over the last ten years. In such a scenario alternative fuels like ethanol have returned on discussion again because of its successful use. In internal combustion engines a better atomized spray is one of the key features to achieve an efficient fuel-and-air mixture in the cylinder inlet. The injection system should keep a good spray pattern and overall performance. In conventional spark engines the spray is commonly generated by injectors with pressure or pressure-swirl atomizers in the fuel outlet. The present work focus on pressure-swirl atomizers used in modern electronic fuel injection systems for spark engines. By means of a theoretical-experimental approach, applied fluid mechanics and a statistically based testing programme the atomization process in injectors is studied. This work seeks a predictive mathematical statement for the relationship between the upstream liquid properties and the operating conditions with the spray main characteristics such as the droplet size and velocity field. Such an experimental approach demands injector's selection, test rig design and construction, spray sizing methods, research and adjustment. The experimental approach is based upon two spray evaluation techniques: a qualitative evaluation, such as high speed photography and a non-intrusive quantitative method by Laser Doppler Velocimetry (LDV) for the spray velocity field and the Phase Doppler Particle Analyser (PDPA) for droplet sizing. Finally the predicting models are presented as an engineering tool for the design and development of fuel injectors because their importance for fuel consumption and emission control.

**Keywords:** Injector. Atomizer. Pressure swirl. Fuel injection. Atomization.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	- CARBURADOR BÁSICO.....	36
FIGURA 2	- SISTEMA EFI TÍPICO – ESQUEMÁTICO.....	39
FIGURA 3	- SISTEMA DE INJEÇÃO EFI DETALHE EM CORTE.....	40
FIGURA 4	- SISTEMA DE INJEÇÃO MPFI.....	41
FIGURA 5	- SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA SIDI.....	42
FIGURA 6	- ESQUEMA COMPLETO DE SISTEMA DE INJEÇÃO MPFI.....	43
FIGURA 7	- INJETOR – MODELO UTILIZADO.....	44
FIGURA 8	- SPRAY GERADO POR INJETOR Mecânico-Centrífugo.....	53
FIGURA 9	- GEOMETRIA TÍPICA DE SPRAY DE CONE OCO.....	53
FIGURA 10	- ÂNGULO DE CONE E COMPRIMENTO DE QUEBRA.....	55
FIGURA 11	- COMPRIMENTO DE QUEBRA - FOTO ALTA VELOCIDADE..	56
FIGURA 12	- SPRAY – PONTO P (X, Y, Z).....	59
FIGURA 13	- INJETOR- CORTE LONGITUDINAL.....	61
FIGURA 14	- SPRAY DE INJETOR – FOTO CONVENCIONAL.....	61
FIGURA 15	- ELEMENTOS DO SPRAY DE CONE OCO.....	63
FIGURA 16	- DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DO SPRAY CÔNICO.....	83
FIGURA 17	- BICO INJETOR.....	94
FIGURA 18	- RESUMO DE TÉCNICAS NÃO INTRUSIVAS.....	95
FIGURA 19	- ESQUEMA DE BANCADA PARA FOTOS DE ALTA VELOCIDADE .....	99
FIGURA 20	- FOTO DE ALTA VELOCIDADE.....	99
FIGURA 21	- PRINCÍPIO DE ESPALHAMENTO DE RAIOS LASER- MEDIDOR MALVERN.....	100
FIGURA 22	- FLUXOGRAMA DA BANCADA DE ENSAIOS.....	103
FIGURA 23	- VELOCIDADE. VARREDURA DIAMETRAL. ÁGUA DESMINERALIZADA. PRESSÃO DE 4 MPa.....	108
FIGURA 24	- VELOCIDADE. VARREDURA DIAMETRAL. ÁGUA DESMINERALIZADA. PRESSÃO DE 6 MPA.....	108
FIGURA 25	- DIÂMETRO (SMD) VARREDURA DIAMETRAL. ÁGUA DESMINERALIZADA, PRESSÃO DE 6 MPA.....	109
FIGURA 26	- CONTAGEM DE GOTÍCULAS EM 10 S. ÁGUA DESMINERALIZADA, VÁRIAS PRESSÕES.....	111
FIGURA 27	- CONTAGEM DE GOTÍCULAS EM 10 S. ÁGUA DESMINERALIZADA. PRESSÃO DE 6 MPa.....	112
FIGURA 28	- ZONA DE MEDIÇÃO .....	112
FIGURA 29	- CURVA DE VELOCIDADE .PRESSÃO DE 1 MPa. VÁRIAS DISTÂNCIAS DO ORIFÍCIO DE DESCARGA.....	113
FIGURA 30	- ALINHAMENTO A LASER DO SISTEMA DE COORDENADAS.....	116
FIGURA 31	- MASSA ESPECÍFICA DOS FLUIDOS DE TESTE A 20°C - VALORES MEDIDOS.....	118
FIGURA 32	- VISCOSIDADE DOS FLUIDOS DE TESTE NAS TEMPERATURAS DE 10°C E 25°C VALORES MEDIDOS.....	118
FIGURA 33	- TENSÃO SUPERFICIAL DOS FLUIDOS DE TESTE NAS TEMPERATURAS DE 10°C E 25°C - VALORES MEDIDOS....	1 19



FIGURA 34	- ORIENTAÇÃO DE MONTAGEM – VISTA SUPERIOR.....	120
FIGURA 35	- CURVA PRESSÃO x VAZÃO DOS INJETORES COM DIFERENTES FLUIDOS DE TESTE .....	122
FIGURA 36	- CURVA VELOCIDADE MÉDIA x PRESSÃO, POSIÇÃO Z = 40mm ,VÁRIOS FLUIDOS.....	124
FIGURA 37	- CURVA DIÂMETRO MÉDIO DE GOTÍCULAS x PRESSÃO, POSIÇÃO Z= 40mm .....	126
FIGURA 38	- VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS ADIMENSIONAIS DOS ENSAIOS; ESCALA LOGARÍTMICA.....	130
FIGURA 39	- CORRELAÇÃO ENTRE VALORES PREDITOS E OBSERVADOS REGRESSÃO NÃO-LINEAR PARA VELOCIDADES, EQUAÇÃO DE R&L .....	133
FIGURA 40	- DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DOS VALORES PREDITOS REGRESSÃO NÃO-LINEAR.....	134
FIGURA 41	- DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DOS RESÍDUOS ENTRE VALORES PREDITOS; REGRESSÃO NÃO-LINEAR..	134
FIGURA 42	- CORRELAÇÃO ENTRE VALORES PREDITOS E OBSERVADOS REGRESSÃO NÃO-LINEAR PARA DIÂMETROS, EQUAÇÃO R&L .....	138
FIGURA 43	- DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DOS VALORES PREDITOS - REGRESSÃO NÃO-LINEAR PARA DIÂMETROS.....	139
FIGURA 44	- DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DOS RESÍDUOS ENTRE VALORES PREDITOS E MEDIDOS.....	139

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- ÍNDICES PARA CÁLCULO DO DIÂMETRO REPRESENTATIVO.....	57
TABELA 2	- GRANDEZAS ENVOLVIDAS NA ADIMENSIONALIZAÇÃO.....	75
TABELA 3	- PROPRIEDADES DE LÍQUIDOS .....	93
TABELA 4	- COMPARATIVO DAS TÉCNICAS A LASER.....	102
TABELA 5	- ÁRVORE DE ENSAIOS.....	115
TABELA 6	- INJETORES UTILIZADOS.....	117
TABELA 7	- PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS DE TESE UTILIZADOS.....	117
TABELA 8	- CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE TESTE SEGUNDO PROPRIEDADES CRESCENTES- VALORES MEDIDOS.....	119
TABELA 9	- CARACTERÍSTICAS DOS INJETORES UTILIZADOS.....	123
TABELA 10	- SEPARATA DO BANCO DE DADOS – ENSAIOS USANDO A EQUACAO DE RISK e LEFEBVRE .....	129
TABELA 11	- RESUMO COMPARATIVO DOS MODELOS PARA O CAMPO DE VELOCIDADES SEGUNDO VARIAS PROPOSTAS DE CALCULO DE $t_0$ .....	131
TABELA 12	- ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO DE REGRESSÃO PARA VELOCIDADE.....	135
TABELA 13	- RESUMO COMPARATIVO DOS MODELOS PARA O CAMPO DE DIÂMETROS SEGUNDO VARIAS PROPOSTAS DE CALCULO DE $t_0$ .....	137
TABELA 14	- ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO DE REGRESSÃO PARA DIÂMETROS.....	142
TABELA 15	- VALIDAÇÃO DE ENSAIOS; VELOCIDADES (m/s).....	141
TABELA 16	- VALIDAÇÃO DE ENSAIOS; DIÂMETROS (m).....	141

## LISTA DE ABREVIATURAS

Adimens.	–	Adimensional
CFD	–	“ <i>Computational Fluid-Dynamics</i> ” = Fluidodinâmica Computacional
LALLS	–	“ <i>Low Angle Laser Light Scattering</i> ” = espalhamento de raios laser de baixo ângulo
LDI	–	<i>Laser Doppler Interferometry</i> = Interferometria por efeito Doppler em Laser
LDV	–	“ <i>Laser Doppler Velocimetry</i> ”=Medição de velocidade por efeito Doppler em Laser
LISA	–	“ <i>Linear Instability Sheet Atomization</i> ” Modelo de simulação linear para atomização por instabilidade do filme
SMD	–	“ <i>Sauter Mean Diameter</i> ” = diâmetro estático representativo de Sauter
MCI	–	Motor de combustão interna
SI	–	“ <i>Spark Ignition</i> ” = motor de combustão interna (MCI) em que a explosão da mistura é provocada pela energia de uma centelha em ciclo termodinâmico OTTO de 4 tempos
GDI	–	“ <i>Gasoline Direct Injection</i> ” = injeção direta de gasolina, ou combustível, dentro do cilindro motor de combustão interna (MCI)
EFI	–	“ <i>Electronic Fuel Injection</i> ” = injeção eletrônica de combustível
PDPA	–	<i>Phase Doppler Particle Analyser</i> = Analisador de partículas por efeito Doppler
PFI	–	“ <i>Port Fuel Injection</i> ” = Injeção eletrônica feita na porta ou coletor de admissão do cilindro.
PIV	–	<i>Particle Image Velocimetry</i> = Medição de velocidade de partícula por imagem
ULEV	–	“ <i>Ultra Low Emission Vehicles</i> ” = veículos com emissões ultra baixas
UHC	–	“ <i>Unburnt Hydrocarbons</i> ” = hidrocarbonetos não queimados
MPFI	–	“ <i>Multi-Port Fuel Injection</i> ” = injeção eletrônica feita na porta ou coletor de admissão em múltiplos cilindros

## LISTA DE SÍMBOLOS

### LISTA DE VARIÁVEIS

Variável	Descrição	Unidade (SI)	Dimensão
$A_0$	- Área de seção transversal de um orifício (descarga)	$m^2$	$L^2$
$A_n$	- Área do núcleo de ar na zona de descarga de atomizador centrífugo	$m^2$	$L^2$
$A_p$	- Área total das portas de entrada do líquido na câmara de giro	$m^2$	$L^2$
$B$	- Constante definida por Han et al (1997)	--	--
$Cd$	- Fator de descarga = vazão mássica real/ vazão mássica teórica	--	adimens.
$C$	- Coeficiente de arrasto	--	<u>adimens.</u>
$C_p$	- Calor específico à pressão constante	$kJ/kg.K$	$L^2.T^{-2}.t^{-1}$
$d$	- Diâmetro	$m$	$L$
$d_g$	- Diâmetro médio estatístico de gota (SMD) em uma dada posição de um spray	$m$	$L$
$\bar{d}_g$	- Diâmetro médio estatístico de gota calculado pela média ponderada pelo número de partículas válidas	$m$	$L$
$d_0$	- Diâmetro do orifício de descarga de um atomizador	$m$	$L$
$d_L$	- Diâmetro do ligamento após ruptura	$m$	$L$
$d_n$	- Diâmetro característico do núcleo de ar em atomizador centrífugo	$m$	$L$
$D_s$	- Diâmetro da câmara de giro, a montante do orifício de descarga	$m$	$L$
$Eu$	- Número de Euler = $\rho/(U_0^2 \cdot \rho_L)$	--	adimens.
$F$	- Razão entre as amplitudes de onda do escoamento viscoso e do inviscido	--	adimens.
$F_N$	- fator de fluxo de um atomizador ("flow number") $\frac{m_L}{\sqrt{\rho_L \cdot \Delta P_L}}$	$m^2$	$L^2$
$k$	- Constante de proporcionalidade	--	adimens.
$K_L$	- Número de onda, de acordo com o modelo LISA	$m^{-1}$	$L^{-1}$
$L$ ou $\ell$	- Comprimento característico	$m$	$L$
$L_b$	- Comprimento de quebra do filme de líquido	$m$	$L$

$\ln\left(\frac{\eta_b}{\eta_0}\right)$	- Segundo o modelo LISA é igual a 12	---	Adimens.
$\dot{m}$	- Vazão mássica	kg/s	$M.T^{-1}$
m	- Número de parâmetros Adimensionais	--	adimens.
Ng	- Número de gotículas	--	adimens.
$\Delta P$	- Pressão diferencial	Pa	$M.L^{-1}.T^{-2}$
p	- Pressão	Pa	$M.L^{-1}.T^{-2}$
PM	- Peso molecular	mol	
$\dot{Q}$	- Vazão volumétrica	$m^3/s$	$L^3.T^{-1}$
Re	- Número de Reynolds $Re = (\rho_L.U_0.d_0) / \mu_L$	--	adimens.
S	- Área	$m^2$	$L^2$
SMD (x,y,z)	- Diâmetro estatístico de Sauter tomado em um ponto de coordenadas (x,y,z) de um spray.	m	L
$t_0$	- Espessura do filme na descarga	m	L
T	- Temperatura do fluido, conforme indicado	K ou $^{\circ}C$	t
$t_b$	- Espessura do filme na zona de quebra do filme	m	L
U	- Velocidade do filme de líquido no orifício de descarga considerando o núcleo de ar	m/s	$L.T^{-1}$
$U_g$	- Velocidade média de gotículas em uma dada posição do spray	m/s	$L.T^{-1}$
$U_0$	- Velocidade do líquido no orifício de descarga (anular)	m/s	$L.T^{-1}$
$\bar{U}$	- Velocidade média ponderada	m/s	$L.T^{-1}$
V	- Volume específico	$m^3/kg$	$L^3.M^{-1}$
X	- Razão entre as áreas do núcleo de ar e do orifício $X = A_n / A_0$	--	adimens.
$We_e$	- Número de Weber $= (\rho_a.d_0.U_0^2) / \sigma$	--	adimens.
x	- Abscissa de um ponto em um spray cônico à jusante da descarga de um atomizador	mm	L
y	- Ordenada de um ponto em um spray cônico em relação a seu eixo principal	mm	L
Z	- Cota de um ponto em um spray cônico em relação a seu eixo principal	mm	L

## **SUBÍNDICES**

0	-	Relativo ao orifício de descarga do bico atomizador
a	-	Relativo ao ar ou meio gasoso
Amb.	-	Condições da sala do experimento
ax	-	Relativo ao eixo, axial
D	-	Relativo ao diâmetro
F ou f	-	Relativo a fluido
g	-	Relativo à gota
h	-	Relativo ao ligamento
int	-	Relativo às condições internas, à montante da descarga do bico
L ou l	-	Relativo ao líquido
n	-	Relativo ao núcleo
r	-	Relativo ao raio, radial
sc	-	Superfície de controle
t	-	Relativo à tangente, tangencial
teórico	-	Relativo às condições teóricas
U	-	Relativo à velocidade
vc	-	Volume de controle
x, y, z	-	Relativo às posições x, y e z respectivamente

## **SUPERÍNDICES**

De “A” até “F”	Expoentes a determinar na função de correlação para velocidades
De “G” até “L”	Expoentes a determinar na função de correlação para diâmetros

## SÍMBOLOS GREGOS

Variável		Descrição	Unidade (SI)	Dimensão
$\alpha$	-	Ângulo de cone do spray	Graus/ rad	--
$\delta$	-	Semi-ângulo de posição da gotícula em um spray	Graus/ rad	--
$\theta$	-	Semi-ângulo do cone de spray $\theta = \alpha / 2$	Graus/ rad	--
$\rho$	-	Massa específica	kg/m <sup>3</sup>	M.L <sup>-3</sup>
$\sigma$	-	Tensão superficial	kg/s <sup>2</sup>	M.T <sup>-2</sup>
$\mu$	-	Viscosidade dinâmica	kg/(m.s)	M.L <sup>-1</sup> .T <sup>-1</sup>
$\nu$	-	Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s	L <sup>2</sup> .T <sup>-1</sup>
$\tau$	-	Tempo de quebra	s	t
$\Omega$	-	Taxa máxima do crescimento de onda	1/s	t <sup>-1</sup>

## SUMÁRIO

1.	<b>INTRODUÇÃO</b>	18
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2	BREVE DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO EM MOTORES	21
1.3	MOTIVAÇÃO	23
1.4	ORGANIZAÇÃO DA TESE	24
2.	<b>OBJETIVOS E DESCRIÇÃO SUMÁRIA</b>	26
2.1.	OBJETIVOS	26
2.2.	PREMISSAS	27
2.3.	JUSTIFICATIVA	28
2.4.	ABORDAGEM	28
2.5.	HIPÓTESE	29
3.	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	30
3.1.	INTRODUÇÃO	30
3.2.	HISTÓRICO SOBRE ALIMENTAÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)	31
3.3.	SISTEMAS GERADORES DE MISTURA CARBURADA EM MOTORES	34
3.3.1	CARBURADOR	35
3.3.2	SISTEMAS DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL	38
3.3.3	SISTEMA CONVENCIONAL MAIS UTILIZADO NO BRASIL	42
3.3.4	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE INJEÇÃO	44
3.4.	A IMPORTÂNCIA DA ATOMIZAÇÃO	45
3.4.1	TIPOS DE ATOMIZADORES – UMA BREVE DESCRIÇÃO	49
3.4.1.1	ATOMIZADORES MECÂNICOS	49
3.4.1.2	DUPLO-FLUIDO	50
3.4.1.3	ROTATIVOS CENTRÍFUGOS	50
3.4.1.4	EFERVESCENTES	51
3.4.1.5	ELETROSTÁTICOS	51
3.4.1.6	“EXÓTICOS”	51
3.5	ELEMENTOS DA TEORIA DA ATOMIZAÇÃO APLICADA A INJETORES	52
3.5.1	MORFOLOGIA DE SPRAY CÔNICO OCO	52
3.5.2	CARACTERÍSTICAS DO SPRAY CÔNICO OCO	54
3.5.2.1	ÂNGULO DE CONE DO SPRAY (A)	55
3.5.2.2	COMPRIMENTO DE QUEBRA LB	55
3.5.2.3	DIÂMETRO REPRESENTATIVO DE UM SPRAY $D_G$	56
3.5.2.4	VELOCIDADE DAS GOTAS U (X, Y, Z)	58
3.5.2.5	NÚMERO DE FLUXO (FN)	60
3.6	ATOMIZADORES PARA INJETORES- ESTADO DA ARTE	60
3.6.1	MODELOS DE ATOMIZAÇÃO DE SPRAYS DE CONE OCO	62
3.6.1.1	O MODELO DE CHRYSSAKIS ET AL.	64
3.6.1.2	O MODELO DE HAN E REITZ	65
3.6.1.3	O MODELO DE NAGAOKA E KAWAMURA	66
3.7	A EXPERIMENTAÇÃO NO ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE INJETORES	67



4	<b>MÉTODOS E MATERIAIS</b> .....	70
4.1	MÉTODOS DE ABORDAGEM .....	70
4.1.1	MARCO ATUAL .....	70
4.1.2	METODOLOGIA .....	71
4.1.3	MARCO REFERENCIAL .....	72
4.2	ANÁLISE DIMENSIONAL DE GRANDEZAS ENVOLVIDAS NO SPRAY .....	72
4.2.1	PRIMEIRO PARÂMETRO ADIMENSIONAL: $\Pi_1$ .....	75
4.2.2	SEGUNDO PARÂMETRO ADIMENSIONAL: $\Pi_2$ .....	76
4.2.3	PARÂMETRO $\Pi_3$ .....	76
4.2.4	PARÂMETRO $\Pi_4$ .....	76
4.2.5	PARÂMETRO $\Pi_5$ .....	77
4.2.6	PARÂMETRO $\Pi_6$ .....	77
4.2.7	PARÂMETRO $\Pi_7$ .....	77
4.2.8	PARÂMETRO $\Pi_8$ .....	78
4.2.9	RESUMO DOS PARÂMETROS $\Pi$ .....	78
4.3	ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ADIMENSIONAL .....	79
4.4	EQUACIONAMENTO DE UM SPRAY CÔNICO .....	82
4.4.1	RELAÇÕES GEOMÉTRICAS .....	84
4.4.2	NÚMERO DE FLUXO $FN$ .....	84
4.4.3	COEFICIENTE DE DESCARGA $CD$ .....	85
4.4.4	VAZÃO MÁSSICA TEÓRICA ( $\dot{m}_{teórica}$ ) .....	85
4.4.5	CÁLCULO DO COEFICIENTE DE DESCARGA REAL .....	86
4.4.6	CÁLCULOS DA VELOCIDADE REAL DO LÍQUIDO NA DESCARGA .....	86
4.4.7	MODELOS PARA CÁLCULO DE $T_0$ .....	87
4.4.7.1	PROPOSTA DE GIFFEN E MURASZEW .....	87
4.4.7.2	PROPOSTA DE SIMMONS E HARDING .....	88
4.4.7.3	PROPOSTA DE RIZK E LEFEBVRE .....	88
4.4.7.4	PROPOSTA DE GRIFFEN E RISK .....	88
4.4.8	CÁLCULOS DOS PARÂMETROS ADIMENSIONAIS .....	89
4.5	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS .....	89
4.5.1	ABORDAGEM ESTATÍSTICA .....	90
4.5.2	TESTES EXPLORATÓRIOS – FASE 1 .....	91
4.5.3	FORMAÇÃO DO BANCO DE DADOS E ANÁLISE .....	92
4.5.4	LISTA DE LÍQUIDOS DE TESTE .....	93
4.5.5	INJETORES ESCOLHIDOS .....	94
4.6	TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE SPRAYS UTILIZADAS .....	94
4.6.1	FOTOGRAFIA CONVENCIONAL .....	97
4.6.2	FOTOGRAFIA DE ALTA VELOCIDADE .....	97
4.6.3	ESPALHAMENTO DE RAIOS LASER (MALVERN) .....	99
4.6.4	INTERFEROMETRIA POR EFEITO DOPPLER EM LASER (PDI, PDPA, LDV) .....	100
4.6.5	COMPARATIVO DAS TÉCNICAS UTILIZADAS .....	101
4.7	APARATO EXPERIMENTAL .....	102
4.8	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	104
5	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	106
5.1	RESULTADOS DA FASE 1 – TESTES PELIMINARES .....	106
5.1.1	TESTES PRELIMINARES .....	106
5.1.2	ESCOLHA DA ZONA DE MEDIÇÃO .....	107

5.1.2.1	SIMETRIA DO SPRAY.....	107
5.1.2.2	ZONA DE “COROA”.....	111
5.1.2.3	DISTÂNCIA À JUSANTE DO ORIFÍCIO DE DESCARGA .....	113
5.1.3	ROTEIRO DE ENSAIO – PADRÃO .....	114
5.1.3.1	LISTA DE INJETORES- DIÂMETROS.....	116
5.1.3.2	LISTA DE LÍQUIDOS .....	117
5.1.3.3	PRESSÕES .....	120
5.1.3.4	POSIÇÕES .....	120
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS- FASE 2.....	121
5.2.1	VAZÃO NOS INJETORES .....	121
5.2.2	PERFIL DE VELOCIDADES NO SPRAY .....	123
5.2.2.1	INFLUÊNCIA DA PRESSÃO.....	124
5.2.2.2	INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS .....	125
5.2.3	PERFIL DE DIÂMETRO DE GOTÍCULAS NO SPRAY.....	125
5.2.3.1	INFLUÊNCIA DA PRESSÃO.....	126
5.2.3.2	INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS .....	127
5.3	MODELAGEM DAS VARIÁVEIS POR REGRESSÃO NÃO-LINEAR..	127
5.3.1	MODELO DE REGRESSÃO PARA O CAMPO DE VELOCIDADES ..	130
5.3.2	MODELO DE REGRESSÃO PARA O CAMPO DE DIÂMETROS DE GOTÍCULAS .....	136
5.4	VALIDAÇÃO DO MODELO PARA O CAMPO DE VELOCIDADES ....	140
5.5	VALIDAÇÃO DO MODELO PARA O CAMPO DE DIÂMETROS .....	141
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	142
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES</b> .....	144
7.1	ESTUDOS NA ÁREA DE ATOMIZAÇÃO.....	144
7.2	ESTUDOS NA ÁREA DE COMBUSTÃO .....	145
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	146
	<b>GLOSSÁRIO</b> .....	151
	<b>ANEXOS</b> .....	152
	ANEXO 1 - Fluxograma da bancada de ensaios	
	ANEXO 2 - Desenho dos injetores testados	
	ANEXO 3 - Desenho da bancada de ensaios	
	ANEXO 4 - Lista de equipamentos da bancada	
	ANEXO 5 - Roteiro de ensaios -padrão	
	ANEXO 6 - Banco de dados - dados de entrada- exemplo	
	ANEXO 7 - Banco de dados - parâmetros adimensionais- exemplo	

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de conversão de combustíveis para a geração de potência em motores de combustão interna envolve diversos parâmetros térmicos, fluidodinâmicos, reações químicas e transformações físicas. Um dos principais estágios do funcionamento dessas máquinas é o preparo da mistura dos dois reagentes, ou seja, a injeção do combustível e o ar de combustão. Neste capítulo abordam-se, através de uma visão geral, aspectos importantes do desenvolvimento de motores, especialmente os relacionados com o processo de preparo da mistura e conversão dos reagentes. Verifica-se a relação entre a qualidade da mistura ar-combustível e o processo de atomização do combustível líquido.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O projeto de motores de combustão interna de melhor desempenho, eficiência térmica e emissões ambientalmente aceitáveis tem sido o objetivo de fabricantes de automóveis no mundo todo. Os novos diferenciais competitivos indicam um forte apelo ambiental em um mercado consumidor cada vez mais sensível às estas questões. A indústria automobilística, por sua vez responde a tais demandas oferecendo opções de motores mais econômicos e eficientes. Autores como Taylor (1995) e mais recentemente Chryssakis (2003), afirmavam fortemente tal tendência. Além disso, a presença crescente de biocombustíveis, especialmente no Brasil, criou um mercado promissor para os motores multi-combustível, denominados popularmente como “flexíveis”. A presença crescente do etanol, além do Brasil, como o energético para veículos é mencionada por Balat (2009) como um caminho sem volta, frente a questões ambientais como o aquecimento global. Este panorama apresenta, em médio prazo, duas fortes tendências mundiais na atividade de locomoção: a conservação de energia e, sobretudo uma menor carga de poluentes por quilômetro-carga. Jones (2008), em sua recente revisão sobre as novas diretrizes americanas para o desenvolvimento de veículos leves, confirma a

tendência de carros mais econômicos (35 milhas/ galão = 14,9 Km/l) e menos poluentes. Com efeito, essas questões têm notoriamente norteado a pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica nesta área, conforme comenta Richards (2001).

Até meados da década de 70 os fabricantes buscavam melhor desempenho quanto à potência, controle de aceleração e durabilidade das partes do motor. Com as crises do petróleo no final dos anos 70 e início da década seguinte as pesquisas em motores de combustão interna – MCI se voltaram para a economia de combustível, compactação do conjunto e redução de custos de fabricação.

Os anos 90, entretanto, foram marcados pelas crescentes restrições ambientais quanto a emissões de gases de combustão, ocorrida em muitos países, inclusive o Brasil, através de um maior rigor na legislação conforme comenta Desantes (2005). Os efeitos maléficos da emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrocarbonetos ( $\text{HC}$ ) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), especialmente em grandes centros, resultaram em um redirecionamento da engenharia de motores buscando máquinas menos poluentes. Além disso, como resultado de pesquisas nesta área, surgiram também os equipamentos de controle na pós-combustão ou de “fim de tubo” como os catalisadores e filtros.

O controle de emissões de gases do efeito estufa, sobretudo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), como compromisso de nações desenvolvidas à ameaça de mudanças climáticas globais, serviu como forte motivação para a conservação de energia em motores e a pesquisa de novos combustíveis. Esse processo evolutivo culmina atualmente com a procura de motores mais versáteis, tolerantes a diferentes energéticos como biocombustíveis e gás natural. Alguns autores como Taylor (1995) e relatórios americanos sobre o desenvolvimento de novos veículos, tais como o “Review of the Research Program of the Partnership for a New Generation of Vehicles: Seventh Report (2001)” mencionam o binômio eficiência - emissões como norteador de estudos para a obtenção de máquinas otimizadas.

Um menor consumo de combustível para um mesmo despacho de potência resulta em menor taxa de emissão de poluentes por veículo. Estes poucos, mas desafiadores, objetivos tornaram-se uma das mais críticas questões entre fabricantes, projetistas e sociedade: o conflito entre potência, redução do consumo de combustíveis e a minimização da emissão de gases poluentes, conforme

comenta Chryssakis (2003). Essa questão remete inclusive à discussão da influência do automóvel, suas consequências na vida moderna e nas relações humanas.

O desempenho global do motor de combustão interna, seja a ciclo Diesel ou ciclo Otto, depende naturalmente de muitos fatores que envolvem todos os componentes do motor, conforme comenta Taylor (1995). O autor ressalta que as partes de maior interesse, contudo, são os sistemas e dispositivos relacionados com a queima do combustível propriamente dito.

A conversão de combustíveis líquidos é a fonte de calor dos ciclos termodinâmicos mais empregados em motores, seja à pressão constante - ciclo Diesel - ou a volume constante - ciclo Otto. Através da reação de combustão ocorre o aporte de calor ao sistema, a expansão dos gases no cilindro e finalmente a movimentação do pistão para a realização de trabalho mecânico, segundo ensina Taylor (1995).

A reação de combustão ocorre em fase gasosa, conforme comenta Kuo (2005), no interior do cilindro do motor, entre os vapores ou gases combustíveis, normalmente hidrocarbonetos e o oxigênio do ar atmosférico, admitidos e introduzidos na câmara de combustão. A alimentação da mistura carburada em motores do ciclo Otto é feita pelo carburador ou, modernamente, pelos sistemas de injeção eletrônica. Nesse contexto a administração de combustíveis líquidos e sua interação com o ar têm papel fundamental na reação, conforme comenta Taylor (1995) em seu livro, considerando que antes de reagir o combustível líquido deve ser vaporizado e misturado com o ar.

O autor também ensina que dentre os vários fatores que afetam a reação de combustão está o controle do excesso de ar, parâmetro fundamental na eficiência de queima. O excesso depende da proporção entre as correntes de ar e de combustível. Esta relação entre os dois reagentes determina se a combustão será ou não completa segundo sua estequiometria. Nesta fase o descontrole das proporções pode levar a perdas substanciais de energia, seja na condição super-estequiométrica, quando haverá sobra de oxigênio ou na condição subestequiométrica, em que haverá menos oxigênio do que o necessário, resultando em reação incompleta ou sobra de combustível.

Taylor (1988) comenta ainda que tão importante quanto a relação entre as duas correntes que adentram o motor esta a interação entre eles, ou seja, o controle e uniformidade da mistura.

Em motores busca-se a injeção do combustível na forma de jatos de gotículas para o aumento da superfície de contato e a geração de turbulência através da transferência de quantidade de movimento. Lefebvre (1989) menciona que o spray promove uma rápida vaporização do líquido e, pela turbulência, uma melhor mistura com o ar. No caso dos motores do ciclo Otto, em que se usam normalmente combustíveis líquidos como gasolina ou álcool, a mistura que adentra a câmara para a reação é denominada de mistura carburada. Pode-se conseguir a mistura carburada por dispositivos de injeção especializados que operam segundo diferentes tecnologias, mas os principais equipamentos responsáveis são o carburador e sistema de injeção eletrônica de combustíveis.

Autores como Taylor (1995), Lefebvre (1989), Birch (2000) e pelo menos três outros pesquisados Desantes (2005), Mitra (1999), Lee (2007) reafirmam a importância da qualidade da mistura carburada na conversão de combustíveis líquidos. Nesse sentido o surgimento dos sistemas de injeção eletrônica foi um importante passo na tecnologia de motores e oferecem muitas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento pelo aprofundamento em estudos de atomização. Também Alkidas (2007), em sua revisão sobre os últimos avanços na área de motores a gasolina, reafirma a importância de pesquisas em engenharia sobre a administração do combustível nessas máquinas.

## 1.2 BREVE DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO EM MOTORES

Os motores de combustão interna que operam segundo os principais ciclos termodinâmicos de Otto e Diesel demandam a injeção controlada dos reagentes necessários à reação de combustão, ou seja, o combustível e o ar atmosférico. O ponto de injeção segundo a posição do pistão, o controle de proporção e a duração do processo são parâmetros indispensáveis ao desempenho satisfatório desses motores, conforme comenta Taylor (1995).

Os dispositivos responsáveis pela formação da mistura carburada sofreram um processo evolutivo, popularmente dividido em duas grandes “eras” caracterizadas pelo uso do carburador e finalmente pelos sistemas de injeção eletrônica.

O carburador equipou motores desde sua invenção até meados da década de 80. Foi o primeiro dispositivo encarregado de produzir uma mistura ar e combustível melhor elaborada, apto as diferentes demandas do motor e com tolerância às condições do ar de combustão. O desenvolvimento do carburador é mais profundamente tratado no capítulo 3.

Modernamente os sistemas de injeção eletrônica vieram substituir com vantagem os carburadores (BIRCH, 2000, p. 1). Compreendem várias partes, desde o módulo de comando, dutos de combustível, cablagem de sinal, até o dispositivo principal de administração do combustível propriamente dito, denominado de injetor. É constituído de um recipiente com entrada de combustível a uma determinada pressão e um orifício de descarga, obturado por uma válvula do tipo agulha, comandada por um solenóide. Através de um pulso de corrente enviado pelo módulo eletrônico de comando, a solenóide induz um campo eletromagnético, deslocando a agulha obturadora, abrindo a válvula e liberando certa quantidade de combustível.

Os injetores, além de administrar o combustível líquido, possuem uma segunda função, a de gerar um spray de gotículas controlado que, misturadas com o ar, formam a mistura carburada para queima no cilindro.

Hoje em dia os sistemas de injeção eletrônica, iniciado pelo EFI há cerca de 20 anos, vêm evoluindo para a injeção direta de combustível (DI), conforme ensina Drake (2007). Nesse caso o injetor administra o combustível diretamente no cilindro do motor, contra uma pressão bem superior à atmosférica, com injeção próxima do ponto morto superior. Os vários tipos e tecnologias têm em comum o dispositivo de injeção, que serão apresentados no capítulo 3 - Revisão bibliográfica. Ele encerra o principal fenômeno físico ligado à formação da mistura carburada: o processo de atomização do líquido, que será amplamente estudado neste trabalho.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

Chryssakis (2003) comenta que, atualmente, o principal objetivo dos grandes fabricantes de veículos é, através de pesquisa científica, melhorar o desempenho do motor, sobretudo no que se refere à economia de combustível e emissão de poluentes.

Dentre os vários parâmetros que influenciam o desempenho global do motor está a qualidade da mistura carburada, formada pelo ar e o combustível na forma de gotículas e seus vapores.

A pesquisa e o desenvolvimento de injetores de combustíveis para motores de combustão interna tipo Otto trouxeram importantes ganhos em desempenho e confiabilidade, conforme comentam Birch (2000), Mitra (1999), Chryssakis (2003) e pelo menos mais cinco autores pesquisados como Taylor (1995), Desantes (2005), Mitra (1999), Lee (2007) e Choi (2004).

Os preços internacionais do petróleo, que já superaram US\$ 120 por barril, bem como as restrições ambientais crescentes, principalmente quanto à emissão de gases do efeito estufa, corroboram fortemente a necessidade de veículos cada vez menos poluentes e mais econômicos.

Autores como Rodonti (2006) e Alkidas (2007) afirmam que o atual cenário indica grandes oportunidades para o desenvolvimento de sistemas de injeção em um contexto de equilíbrio entre conservação de energia e emissões poluentes.

Conforme revela o estado da arte sobre injeção, as abordagens de engenharia disponíveis, como a modelagem fluidodinâmica e a simulação computacional, mostram que alguns fenômenos ainda não podem ser reproduzidos na sua totalidade pelo emprego das equações derivadas da Mecânica dos Fluidos e suas condições de contorno percebidas em modelos de simulação. Lefebvre (1989) ensina que o processo de atomização é, em sua essência, caótico, envolvendo grandes perdas de energia e por isso demandam, no mínimo, uma abordagem com forte apelo experimental. Algumas das principais características do spray não foram convenientemente reproduzidas por computação fluidodinâmica (CFD) e a modelagem física complementada por experimentos é uma das principais alternativas.



Considerando as oportunidades de investigação científica que se apresentam atualmente, indicando o aperfeiçoamento da injeção de combustíveis em motores e as limitações ainda presentes na simulação computacional dos fenômenos envolvidos no processo de atomização, pode-se concluir que há espaço para o aprofundamento de estudos fenomenológicos em atomização. Além disso, a abordagem mista, com forte base experimental, revela-se como uma alternativa viável à formulação de correlações preditivas, ferramentas importantíssimas ao projeto e avaliação desses injetores.

É, portanto, motivador o prosseguimento da investigação científica segundo uma abordagem experimental, pouco presente ou quase inédita em engenharia, especialmente dedicado a correlações preditivas para o campo de velocidades do spray e sua distribuição de diâmetros, características fundamentais aos estudos de vaporização do líquido e formação da mistura carburada.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está dividida em sete capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 2 são apresentados os objetivos e a hipótese formulada para a realização deste trabalho. A fim de obter embasamento teórico necessário foi realizada uma revisão do assunto. Nesta fase determinou-se o marco referencial do conhecimento e o estado da arte da tecnologia de administração de combustíveis líquidos em motores. Observou-se então um campo promissor para o entendimento e melhoria desses dispositivos, pela rota da experimentação. Além disso, vislumbrou-se uma notável oportunidade de contribuição à engenharia de atomização, considerando que trabalhos dessa natureza são surpreendentemente escassos no Brasil. Emanaram então a motivação e as hipóteses.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica mais profunda, objetivando a obtenção de um embasamento teórico amplo. Buscou-se observar a história do desenvolvimento do carburador até a injeção eletrônica. A abordagem teórica dá-se pela apresentação das equações derivadas da mecânica dos fluidos aplicada a injetores, como elementos necessários ao entendimento físico do

fenômeno. Constan também estudos de vários outros autores como construtores do conhecimento agregado até esta data.

No Capítulo 4 são apresentados os métodos de estudo e diagnóstico de atomizadores através da experimentação. Constan as técnicas de medição, o aparato experimental empregado, a construção do banco de dados e sua interpretação.

No Capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos e sua efetividade. Apresenta-se uma análise crítica sobre os resultados e a as correlações obtidas como ferramenta de engenharia.

No Capítulo 6 são feitos os comentários finais, as conclusões sobre o trabalho e validação de resultados. Finalmente, no Capítulo 7 apresentam-se sugestões e oportunidades para prosseguimento e aprofundamento de estudos sobre a matéria.

## 2. OBJETIVOS E DESCRIÇÃO SUMÁRIA

As pesquisas e o aprofundamento dos assuntos relacionados com a geração da mistura carburada indicaram inequívoca relação com o processo de atomização do líquido. O levantamento do estado da arte, consolidado no capítulo 3 - Revisão Bibliográfica, revelou a carência de correlações para as principais características do spray como o diâmetro representativo de gotículas e, especialmente, o seu campo de velocidades.

A disponibilidade de recursos investigatórios para sprays, muito escassa em passado recente, mostra-se como uma das principais razões da carência dessas ferramentas de predição. A chegada de medidores de partículas a laser, contudo, mudou essa realidade, tornando possível e inédita a proposta desse trabalho.

Sabe-se que para o estudo da vaporização das gotas de combustível é indispensável o conhecimento de sua dinâmica. A identificação da necessidade dessas ferramentas de engenharia reforçou a motivação entorno desse trabalho

Para que se possa explicar de forma clara e objetiva o conteúdo dessa tese de doutorado tem-se:

### 2.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo (**o quê?**):

- realizar uma investigação experimental sobre o processo de atomização de líquidos em atomizadores mecânicos centrífugos, sobretudo os empregados em injetores de motores de combustão interna;
- caracterizar os principais parâmetros do spray gerado, por medições e experimentos, buscando-se relacionar esses efeitos com as propriedades do líquido à montante do injetor, condições operacionais e geometria do atomizador empregado no injetor de forma a permitir uma avaliação de desempenho;
- obter funções de correlação entre os principais parâmetros, diâmetro

e campo de velocidades do spray, com as propriedades e característica acima mencionadas de forma a oferecer ferramentas de engenharia úteis ao projeto, avaliação e desenvolvimento desses injetores;

- oferecer condições para a melhoria das propriedades físicas de combustíveis líquidos normalmente utilizados em motores de combustão interna pela observação de sprays de melhor desempenho.

## 2.2. PREMISSAS

Assumindo-se que o injetor:

- faça a injeção de combustível através de um spray de gotículas para a formação de mistura carburada necessária a um motor que opere segundo o ciclo termodinâmico Otto;
- tenha parâmetros geométricos conhecidos e opere a injeção de combustível no coletor de admissão do motor, em ambiente onde reinem pressões próximas à atmosférica;
- seja caracterizado por um atomizador mecânico-centrífugo gerando um spray cônico vazio típico;
- opere com líquidos como gasolina ou álcool automotivo com propriedades físicas e condições operacionais conhecidas.

### 2.3. JUSTIFICATIVA

Justifica-se esse trabalho segundo as seguintes contribuições (**Por quê?**):

As funções de correlação constituem uma importante ferramenta para melhoramento dos injetores e, indiretamente, a melhoria de desempenho global do motor, tanto em consumo de combustível (conservação de energia) como em emissões poluentes (conservação ambiental).

### 2.4. ABORDAGEM

O presente estudo será desenvolvido (**como?**):

Através de uma abordagem experimental à luz da Mecânica de Fluidos e análise dimensional dos fenômenos envolvidos no processo de atomização. Para tal serão ainda empregados:

- técnicas de medição não intrusivas para estudo de sprays como fotos magnificadas convencionais e de alta-velocidade;
- medição do campo de velocidades pelo uso de medidor por efeito Doppler em luz coerente LASER (LDV);
- medição do campo de diâmetros de gotículas do spray pelo uso de medidor por efeito Doppler em Laser (PDPA);
- medição de propriedades dos líquidos a serem testadas em laboratório;
- uso um plano de experimentos robusto, estatisticamente fundamentado;
- equacionamento do fenômeno da atomização à Luz da Mecânica de Fluidos.

## 2.5. HIPÓTESE

Os estudos sobre atomizadores mecânicos-centrífugos, em especial os injetores de combustível em motores, segundo uma abordagem experimental cientificamente orientada e estatisticamente baseada, **pode sim lograr êxito** na formulação de correlações matemáticas que permitam predizer o diâmetro médio das gotículas de um spray bem como seu campo de velocidades. Essas correlações podem se tornar ferramentas bastante úteis à engenharia, auxiliando o projeto e a simulação desses dispositivos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a consolidação de um arcabouço de conhecimentos que define o marco referencial deste trabalho, faz-se necessário o levantamento do estado da arte das pesquisas na área de injetores e atomização. Para tal este capítulo traz uma revisão bibliográfica abrangente, necessária ao entendimento do fenômeno e direcionamento da metodologia experimental a ser empregada.

#### 3.1. INTRODUÇÃO

O automóvel tem sido reconhecido como a principal realização individual de engenharia no século XX, segundo a ASME- Associação americana de engenheiros mecânicos. Autores como Lentinelo (2000) comentam que aproximadamente 60 milhões de carros e utilitários leves são montados e vendidos todos os anos mundialmente. A tração é provida tipicamente por motores de combustão interna (MCI) com cilindros alternativos, queimando derivados de petróleo, sobretudo gasolina, assim ensina Drake (2007). Cerca de 12% da população mundial, estimada em seis bilhões de pessoas, possuíam automóveis em 2000. O futuro indica que cerca de 15% da população mundial, estimada em 7,5 bilhões de pessoas em 2030, terão um automóvel, destacando-se um expressivo crescimento esperado na China e Índia. Nos EUA o consumo de veículos atinge 27% do total de energia primária, com 32% das emissões de CO<sub>2</sub> originárias da combustão, 55% dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e 40% do total de emissões de compostos orgânicos voláteis (VOC's). Todas estas emissões são consideradas atuantes no efeito estufa. O cenário indica crescimento do consumo de derivados de petróleo para os próximos 10 anos, até a chegada do pico de produção, estimada por alguns autores como Drake (2007) para 2015 a 2020. Até lá os preços tendem a subir e os investimentos em pesquisa e desenvolvimento de motores menos poluentes e mais econômicos será a tônica, inclusive com a crescente presença de combustíveis renováveis.

Drake (2007) comenta ainda que no início deste século XXI mudanças importantes deverão ocorrer na indústria automobilística mundial e, concomitantemente, uma maior variedade de combustíveis estará disponível aos consumidores, formando um mercado mais diversificado. Os preços, entretanto tendem a se manter crescentes, tanto os de origem fóssil como gasolina e diesel convencionais, como renováveis, como álcool.

O autor menciona ainda que neste contexto os motores a Diesel deverão migrar para a versão turbo-alimentada, sobretudo para carros de passageiros na Europa. Maior presença de carros híbridos nos EUA e o aparecimento, em menor escala, do hidrogênio em MCI's e, principalmente, em células a combustível. O autor prevê ainda uma redução do teor de enxofre na gasolina, como fruto de legislação mais rigorosa em países em desenvolvimento e obrigatoriedade do uso de catalisadores para captura de  $\text{NO}_x$ . Também uma maior presença de energéticos como o metanol e o etanol, biocombustível utilizado no Brasil há mais de 30 anos, mas que vem ganhando atenção mundial.

Apesar dessa mudança da matriz energética para o transporte, as emissões de  $\text{CO}_2$  não indicam redução significativa em 20 ou 30 anos, continuando a ser um dos principais problemas das nações na questão de mudanças climáticas. A forma de tração por motores de combustão interna deve manter-se presente nas décadas vindouras tendo a conservação de energia e o controle de emissões como parâmetros norteadores. Os sistemas de injeção, por sua vez, devem permanecer baseados nos princípios básicos da atomização.

### 3.2. HISTÓRICO SOBRE ALIMENTAÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)

Na primeira metade do século XX, com a crescente popularização do automóvel no ocidente, surgiram demandas de mercado que forçaram os fabricantes a dedicarem-se ao aprimoramento dos motores de combustão interna - MCI. Nesta fase observou-se um considerável desenvolvimento e inovação como as construções multi-cilindros que proporcionaram menos vibração, dirigibilidade e



maior potência. Os sistemas de alimentação da mistura carburada (ar e combustível) ainda eram rudimentares e, da mesma forma, necessitavam de aperfeiçoamento para atender as novas necessidades dos MCI's, ou seja, versatilidade e estabilidade nos diversos regimes de carga. Taylor (1988) comenta que os motores de combustão interna que operam segundo os principais ciclos termodinâmicos de Otto e Diesel demandam a injeção controlada dos reagentes necessários à reação de combustão, ou seja, o combustível e o oxidante (ar). Os sistemas responsáveis pela formação da mistura carburada sofreram um processo evolutivo, dividido popularmente em duas grandes "eras". A primeira foi caracterizada pelo uso do carburador e a segunda, já no final do século XX, o uso dos sistemas de injeção eletrônica de combustível.

Os principais requisitos de potência e rotação de um motor definem os regimes de trabalho que devem ser atendidos pelo sistema de injeção. O carburador, com o objetivo de atender tal diversidade de regimes teve de ser substancialmente aperfeiçoado, tornando-se cada vez mais complexo. A evolução do dispositivo, já em meados da década de 50, aumentou sobremaneira a sua confiabilidade. O principal avanço foi o controle de mistura ar e combustível vinculado à rotação do motor e sua demanda por potência, ou seja, os regimes de trabalho. Taylor (1995) define como principais regimes de trabalho:

- partida a frio: resposta do motor à ignição, sem falhas e continuação do funcionamento de forma estável até o aquecimento das partes e entrada em marcha lenta. Normalmente demanda-se uma mistura mais *rica* (mais combustível do que ar, proporcionalmente);
- marcha lenta: injeção de pequena vazão da mistura carburada, apenas para manter o motor em funcionamento;
- aceleração: resposta estável do motor ao aumento controlado da rotação a uma determinada demanda de torque (carga);
- potência no eixo: máximo fornecimento de potencia à alta rotação e toda aceleração disponível;
- rotação de cruzeiro: Estabilidade e economia (carga leve).

Para atendê-los o fluxo de combustível no carburador diversificou-se através da separação de correntes, com dutos específicos e partes dedicadas ao atendimento de cada regime. Apesar de tudo o carburador sempre manteve o conceito original do tubo de Venturi, seu princípio básico de funcionamento.

Posteriormente surgiram também os motores com carburação dupla em que os cilindros recebiam mistura gerada por carburadores independentes.

Birch (2000) comenta que o processo de alimentação de motores de combustão interna teve grande evolução quando os antigos carburadores foram substituídos por injetores eletro-comandados, a chamada “segunda era”, segundo o autor. Grandes ganhos de desempenho do motor, diminuição do consumo e principalmente redução de emissões poluentes são atualmente qualidades incontestáveis dos injetores. Além dessas vantagens outros importantes ganhos foram obtidos graças ao controle de injeção finamente ajustado aos regimes de trabalho. Atualmente estes sistemas estão disponíveis em veículos regulares, devido à presença de módulos de controle microprocessados. Isso é possível devido a programas de computador gravados em memória eletrônica indelével, tipo EPROM. Os microprocessadores executam algoritmos dedicados a cada regime, adaptando a injeção segundo as condições de múltiplas variáveis. Birch (2000) comenta que, fato impensável no passado, esse conjunto de vantagens deixou o antigo carburador na posição de peça de museu.

Um resumo dos principais sistemas de injeção é apresentado por Drake (2007). Em ordem aproximadamente cronológica, a saber:

- carburador simples;
- carburador duplo;
- injeção eletrônica de combustível – EFI;
- injeção eletrônica multiponto – MPFI;
- injeção direta com ignição à centelha – SIDI;
- idem com comando pelo spray - SG-SIDI (“spray guided SIDI”);
- injeção direta com injeção na parede do cilindro WG-SIDI (“wall guided SIDI”);
- injeção de mistura homogênea e compressão-ignição – HCCI (“homogeneous-charged compression-ignition”).

Os sistemas SIDI não são usados nos EUA e Brasil, devido às peculiaridades da especificação da gasolina. O HCCI traz um conceito misto de ciclo Otto e Diesel em que não há centelha, mas auto-ignição de uma mistura gasolina e ar sob altas pressões. Este sistema está em desenvolvimento e ainda não encontrou espaço nas principais montadoras.

Uma ampla e didática abordagem sobre sistemas SIDI e derivados é feita por Alkidas (2007) mostrando o sistema de injeção MPFI, SIDI e suas tendências em MCI.

Cada um dos sistemas apresentados traz naturalmente vantagens e desvantagens. Drake (2007), entretanto, não menciona uma comparação de desempenhos, uma vez que têm aplicações diferentes, dependentes do tipo de combustível, tipo de motor e características meteorológicas predominantes. Não é objetivo deste trabalho compará-los, mas observar o que têm em comum, ou seja: **o processo de formação da mistura carburada através de um spray de gotículas em um fluxo de ar.**

Quer seja nos sistemas MPFI, mais comuns no Brasil, quer nos sistemas de injeção direta SIDI e seus derivados, a presença do atomizador de combustível (injetor) é indispensável. Os dispositivos que caracterizaram as duas eras, respectivamente o carburador e sistema de injeção eletrônica, serão vistos em detalhes a seguir.

### 3.3. SISTEMAS GERADORES DE MISTURA CARBURADA EM MOTORES

O sistema de geração da mistura carburada, entre combustível e ar, é uma das principais seções do motor de combustão interna, conforme ensina Taylor (1995). O aprofundamento dos estudos nos sistemas de injeção passa pela compreensão das funções e principais dispositivos, que serão mostrados a seguir.

### 3.3.1 Carburador

O dispositivo responsável pela administração de combustível e ar no motor, gerando a mistura carburada, era denominado de carburador. A palavra “carburador” originou-se do francês “carburet”, cujo significado estava associado à interação com carbono. O verbo carburar significava então misturar com carbono, também relato a hidrocarboneto; em outras palavras “fazer uma mistura com hidrocarboneto”. Esse conceito justifica então a palavra e o dispositivo denominado “carburador”. Atualmente a expressão “mistura carburada” é utilizada na engenharia para definir a composição entre o combustível, também denominado “carburante”, e o ar, como fonte de oxidante ou “comburente” capaz de gerar combustão (HISTÓRIA DO CARBURADOR, 2007).

O carburador foi inventado pelo engenheiro húngaro Donat Banki em 1893, tendo registrado seu invento na patente GB 11119. Ferrara (2007) afirma que o inventor teria se inspirado ao observar uma menina que aguava plantas do jardim com um jeito peculiar. Ela punha um pouco da água na boca e aspergia sobre as flores, criando uma espécie de spray.

Em 1896 o inglês Frederick W. Lanchester testou pela primeira vez um carburador do tipo "pavio" em motores para automóvel. Ele construiu o primeiro carro dirigível na Inglaterra usando um motor monocilindro de 5 Hp e transmissão por corrente. Insatisfeito com o desempenho e potência, Lanchester modificou o desenho e construiu um motor com dois cilindros, horizontalmente opostos. Equipou o engenho com um carburador do tipo pavio, sendo que o combustível era conduzido por efeito de convecção e tensão superficial “respingando” o líquido na entrada de ar. Essa versão do veículo de Lanchester conseguiu rodar 1600 km, o que constituiu um importante passo no desenvolvimento de motores.

Inicialmente bastante rudimentar, os carburadores tinham como principal elemento um duto com seção convergente, tipo Venturi, e uma válvula acionada pelo motorista. O controle era simplesmente administrar o líquido combustível pela passagem do ar ao cilindro, por adução, através de respingos. O desempenho naturalmente era sofrível quando comparado com os sistemas atuais, principalmente pelo fato de não atender às diferentes demandas do motor e as variações de aceleração e condições do ar de combustão. As exigências de

locomoção do veículo, em diferentes terrenos, inclinações e cargas exigiam várias relações torque e rotação e conseqüentemente regimes de funcionamento de difícil controle. Eram comuns a perda de rotação e até a parada completa do motor devido à falta de carburação adequada.

Na química de combustíveis, contudo, o carburador é o dispositivo que fornece energia ao motor através do uso de um combustível, normalmente um hidrocarboneto.

O carburador evoluiu e tomou a forma próxima do que se conhece atualmente já no final da década de 20. Era então constituído basicamente de um cilindro aberto por onde passa o ar destinado ao motor, conforme a figura 1.

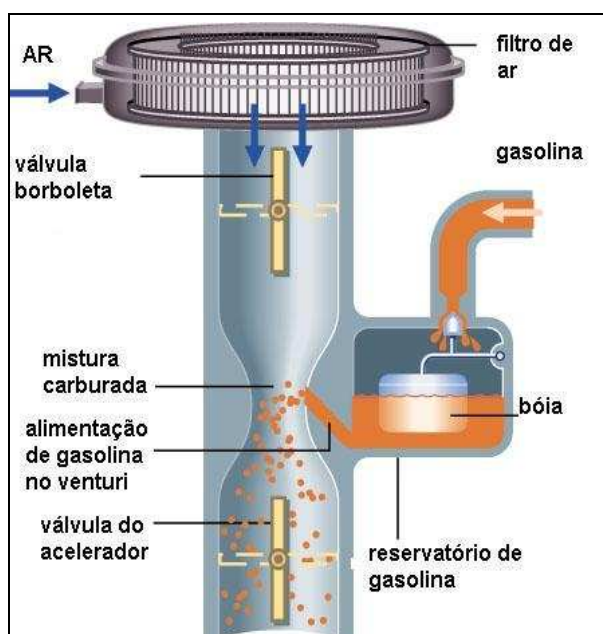


FIGURA 1 - CARBURADOR BÁSICO

No cilindro deve haver uma estricção de forma que o fluxo de ar venha a gerar baixas pressões na garganta, por efeito Venturi. Na seção de menor diâmetro (garganta) a baixa pressão succiona combustível líquido de um reservatório adjacente. Em rotas concorrentes o ar e o combustível encontram-se na garganta. Por efeito de pressão dinâmica o fluxo de ar ajuda a produzir gotas e gotículas, gerando um leve efeito de atomização. A mistura resultante de ar e combustível é finalmente introduzida o cilindro pelo coletor de admissão.

A vazão de ar de combustão é controlada por uma válvula borboleta no duto do carburador. Através de movimento em torno de um diâmetro a válvula

indiretamente controla o nível de depressão e, por conseguinte, a vazão de combustível para a mistura carburada. O comando da válvula borboleta é feito através de um cabo ligado ao pedal do acelerador, de forma que o motorista pode controlá-lo. Sob esse conceito o acelerador não é o “pedal do combustível”, mas sim o “pedal do ar”, pois o controle da válvula atua sobre a vazão do ar e, indiretamente, na sucção do combustível (HISTÓRIA DO CARBURADOR, 2006).

O líquido é introduzido na zona de mistura, na seção de garganta, através de pequenos orifícios calibrados, normalmente chamados de gíglês, do francês “gigleurs”. São peças intercambiáveis normalmente fabricadas em bronze e montadas ao duto de descarga no carburador por rosqueamento. A injeção do combustível é feita por esses orifícios onde é gerado um pequeno jato atomizado ou contínuo de combustível. Os carburadores mais antigos possuíam um pequeno número de orifícios enquanto que os mais modernos, vários deles, inclusive com válvulas individuais para controle de fluxo. Taylor (1988) comenta que essa multiplicidade de orifícios permitia o controle de vazão por restrição de área de passagem e com isso atender os diferentes regimes de serviço do motor, na relação torque e rotação.

Outras formas de injetar combustível e ar no motor foram inventadas, conforme várias patentes disponíveis no Brasil e outros países. Como algum exemplo tem-se o carburador **catalítico** e o **vaporizante**.

O catalítico opera com o princípio básico de mistura de vapores do combustível com água e ar, na presença de catalisadores a base de níquel e platina. O sistema propõe que o combustível seja decomposto em estruturas moleculares mais simples como metano, alcoóis e outros compostos leves. Essas frações então poderiam ser mais convenientemente misturadas com o ar e queimadas com menores excessos de ar. Uma das vantagens seria uma eficiência de 1,8 a 3 vezes superior ao carburador convencional, resultando em significativa economia e redução de emissões.

O carburador vaporizante, por sua vez, tem como apelo a vaporização prévia do combustível, por aquecimento e outros meios, resultando, teoricamente, em uma interação mais eficiente com o ar. Uma questão importante, contudo, era que o combustível vaporizado deixava de cumprir uma função do sistema de injeção líquida indispensável para o motor: a refrigeração das válvulas, tuchos e sedes.

Ambos os tipos até o momento não encontram espaço em veículos de rua devido a sua complexidade e custo elevados. Há, contudo, projetos de pesquisa e desenvolvimento na área, ainda em escala laboratorial.

### 3.3.2 Sistemas de injeção eletrônica de combustível

Segundo Short (2004) a injeção eletrônica apareceu pela primeira vez com o lançamento, pela General Motors dos EUA, do Chevrolet Corvette 1957, um veículo com forte apelo esportivo e inovador para sua época. O controle de abertura do injetor era feito por pulso elétrico e válvulas solenóides uma vez que ainda não existia a eletrônica microprocessada para o comando. O sistema, devido a sua complexidade e custo, não se popularizou. O modelo Corvette oferecia esta injeção como opcional, a um custo substancialmente superior. Tal opção perdurou até 1967 somente, quando a Chevrolet retornou ao carburador devido ao insucesso de vendas.

Na Europa, contudo, a injeção eletrônica realmente ganhou o mercado quando a Volkswagen lançou o sistema Bosch-Jetronic em 1968, simultaneamente ao mercado americano. Rapidamente outros importantes nomes da indústria automobilística como Volvo, Mercedes, AUDI e BMW aderiram ao sistema. O uso do carburador ainda persistiu na Ásia e no Japão até meados da década de 80, quando a legislação sobre emissões forçou a mudança para a injeção eletrônica.

Mas a injeção eletrônica deu um salto realmente importante com a incorporação de duas novas tecnologias: **o emprego da eletrônica microprocessada** embarcada, no gerenciamento do motor, e a técnica de **atomização por atomizadores mecânicos centrífugos**.

O ponto de injeção precisamente definido em função da posição do êmbolo, o controle de proporção e a duração do processo são parâmetros indispensáveis ao desempenho do motor. Estas foram as principais características observadas no sistema, principalmente devido a abertura do injetor por pulso eletronicamente comandado. Birch (2000) comenta que no final dos anos 80 surgiu a possibilidade técnica dos módulos de processamento assumirem o controle não

somente da mistura em si, mas de sua adaptação às demandas do motor com benefícios bastante sensíveis no desempenho, economia e emissão de poluentes. No Brasil, a partir dos anos 90, com a popularização da injeção eletrônica, os carburadores foram praticamente banidos de veículos novos.

Birch (2000) define a injeção eletrônica como um método ou sistema de dosagem de combustível em um fluxo de ar buscando uma mistura precisa das correntes. O módulo de controle, cuja função é comandar o momento e a duração da abertura do bico, consiste em uma placa com dispositivos eletrônicos em duas seções: de baixa e alta corrente. Um microprocessador especializado executa um programa em tempo real. O processamento não administra somente a abertura do bico injetor, mas também outras funções ligadas ao motor considerando vários parâmetros de entrada e saída.

Os primeiros sistemas aplicaram-se à substituição dos carburadores e por isso tinham um único ponto de injeção ou “porta simples” (EFI), conforme se observa na figura 2.

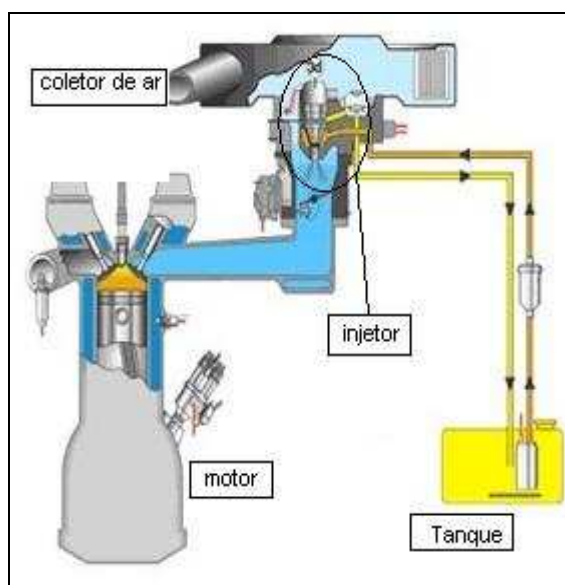


FIGURA 2 – SISTEMA EFI TÍPICO – ESQUEMÁTICO

O spray era gerado por um injetor único, direcionado no coletor de admissão de forma a servir todos os cilindros. A capacidade de cada bico injetor era naturalmente calculada para todas as câmaras de combustão e, nesse aspecto, se parecia muito com os carburadores antigos. A inovação era baseada na melhoria do spray e pela maior pressão do combustível à montante do orifício



de descarga. O ponto de abertura e fechamento do bico injetor, apesar de ser comandado pelo módulo de comando, não era preciso, uma vez que somente um injetor atendia a demanda dos quatro cilindros. Na seqüência de injeção de um motor de quatro cilindros em linha, por exemplo, havia sempre um intervalo de tempo entre a abertura e fechamento das válvulas em que o injetor mantinha-se aberto. Nesse período havia, inevitavelmente, a perda de combustível por passagem direta da mistura carburada para a válvula de escape, causando perda de combustível não convertido. Embora o sistema EFI tenha trazido enormes ganhos em relação ao carburador, muitas vantagens ainda poderiam ser exploradas. A figura 3 apresenta um detalhe do coletor de admissão em corte e o respectivo injetor.



FIGURA 3 – SISTEMA DE INJEÇÃO EFI  
DETALHE EM CORTE.  
FONTE: BIRCH (2000)

Posteriormente surgiram os sistemas multiponto (MPFI), em que cada porta de admissão (cilindro) é equipada com seu próprio injetor. O módulo de comando administra então um número de injetores tantos quanto o número de cilindros. A figura 4 apresenta o corte transversal de um cilindro em que se observa um sistema MPFI com bico de injeção lateral individual (em destaque).

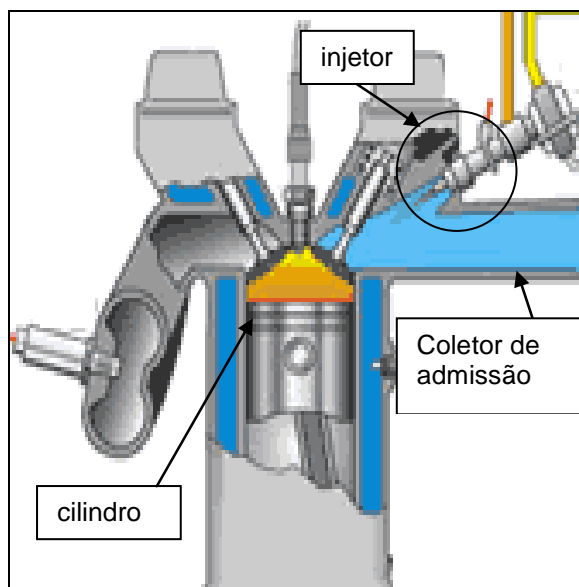


FIGURA 4 – SISTEMA DE INJEÇÃO MPFI.

Em função de uma série de variáveis, que em alguns casos pode chegar a mais de 60 “entradas”, o módulo envia pulsos de abertura com ponto e duração estabelecidos segundo cálculos de “mapas” de injeção. Os mapas são escolhidos em tempo real conforme o regime de trabalho do motor. Encontram-se atualmente vários esquemas ou “mapas” de injeção eletrônica para aplicação em motores. A escolha de um determinado mapa depende de qual desempenho se busca no motor em determinado regime de trabalho. Por exemplo, quando se procura uma maior potência, menor consumo específico ou mesmo uma menor emissão de poluentes. Além disso, surgiram recentemente os mapas de administração segundo a composição de combustíveis em veículos bi-combustíveis (gasolina e álcool), os chamados motores “flexíveis” ou simplesmente “Flex”, atualmente com grande aceitação pelo mercado brasileiro. Como muitos desses objetivos são conflitantes, contudo, é impossível obter-se um desempenho otimizado simultâneo. Ao final os sistemas são projetados para um desempenho global melhorado.

No final da década de 90, aliás, surgiu uma nova tecnologia de injeção de combustível, derivada do MPFI. Segundo Drake (2007) o sistema vem ganhando espaço na Europa, nos últimos dez anos, devido às peculiaridades das gasolinas européias com baixo enxofre. Trata-se da injeção direta de combustível SIDI ou “*spark ignition direct injection*”, mostrado na figura 5.

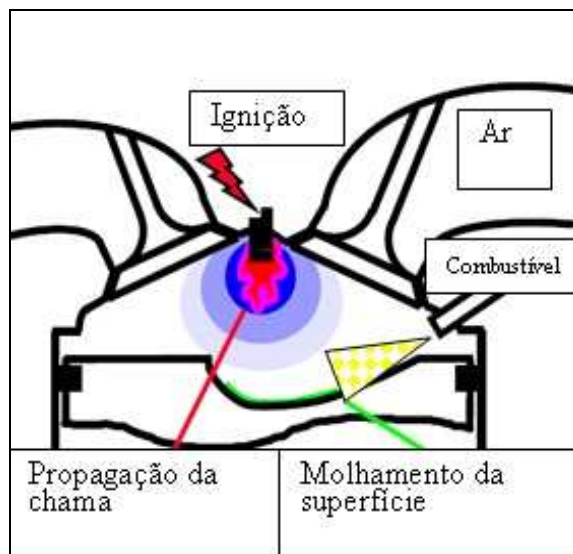


FIGURA 5 – SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA SIDI  
FONTE: DRAKE (2007)

O combustível é administrado por um spray diretamente na câmara de combustão do cilindro, onde reinam pressões acima da atmosférica. Além desse, há atualmente outros sistemas derivados, defendidos por grupos de fabricantes de motores como a indústria japonesa, a coreana, a americana e européia. Alkidas (2007) aborda também as variações do SIDI, sobretudo o jato direto “guiado por spray” com sendo um dos que tem maiores potenciais de desenvolvimento.

### 3.3.3 Sistema convencional mais utilizado no Brasil

No Brasil, o estado da arte de sistema de administração de combustíveis em motores a ciclo OTTO é a injeção do tipo MPFI “*multi-port fuel injection*”, ou simplesmente PFI. Como já descrito o spray é gerado no coletor de admissão de cada cilindro, onde reinam pressões atmosféricas, à montante da válvula de admissão do cilindro (Figura 6). No esquema podem-se observar as principais variáveis de entrada na Unidade Central de Processamento.

Em memória tipo EPROM um programa processa, em tempo real, essas informações administrando o sistema de injeção. As principais ações de “saída”, dentre outros controles, são o momento em que se inicia a abertura da agulha do bico injetor (atraso ou avanço em relação ao momento da centelha, ou ângulo de

giro da biela-manivela) e o tempo que ele permanece aberto, injetando combustível (tempo de pulso).

Como o sistema de pressurização de combustível (bomba e válvula reguladora) mantém pressão constante a montante do injetor, em motores convencionais, a vazão de injeção é indiretamente controlada também. Em veículos do tipo “Flex” há ainda, como entrada da unidade central, a informação de um sensor que detecta a composição da mistura e a relação gasolina e álcool disponível no tanque. Esse sistema (MPFI) chegou ao Brasil por volta de 1996, substituindo aos poucos o sistema EFI.

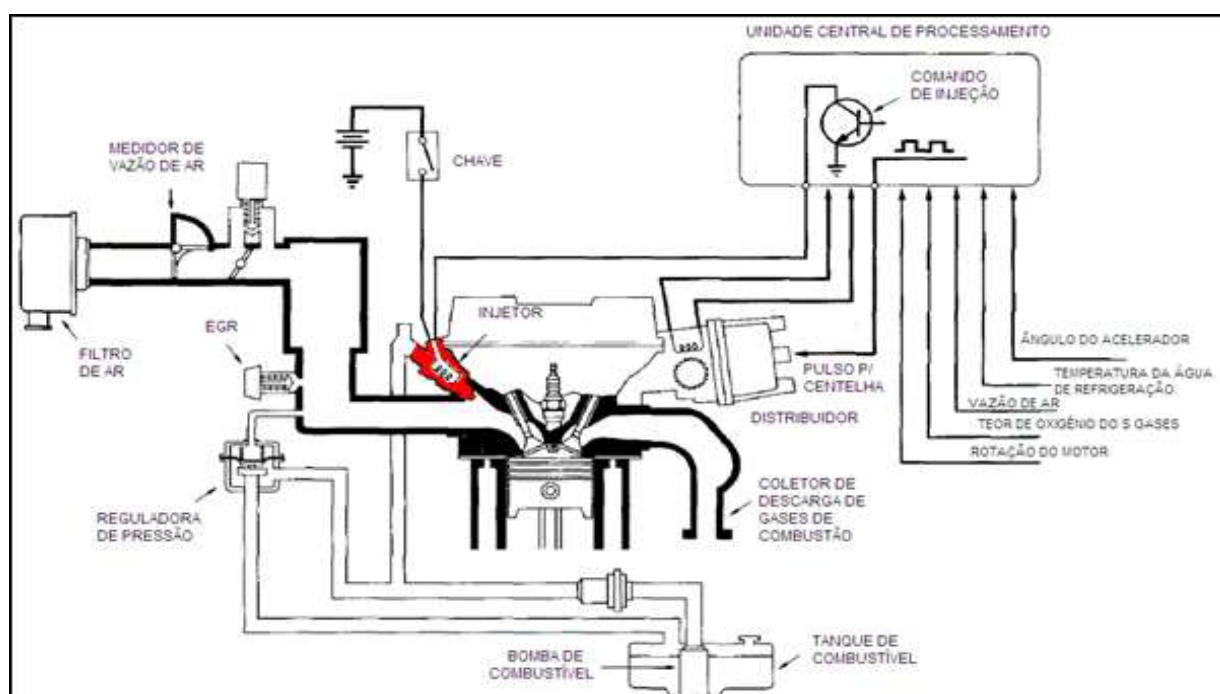


FIGURA 6 – ESQUEMA COMPLETO DE SISTEMA DE INJEÇÃO MPFI  
FONTE: TOYOTA MOTORS (2001)

Alkidas (2007) afirma que se trata do sistema que equipa o maior número de veículos de passageiros no mundo atualmente. No Brasil, da mesma forma, é o sistema mais usado em veículos em circulação e em produção. A figura 7 mostra um injetor de combustível típico de motores de alto desempenho, sendo inclusive um dos utilizados no estudo experimental, objeto desse trabalho.



FIGURA 7 – INJETOR – MODELO UTILIZADO

#### 3.3.4 Principais características do sistema de injeção

Conhecendo-se os principais sistemas de injeção eletrônica em operação atualmente no Brasil e no mundo, pode-se então selecionar suas principais vantagens. Segundo Taylor (1995) pode-se enumerar:

- distribuição uniforme da mistura ar e combustível. No sistema de injeção multiponto cada cilindro possui seu próprio injetor, que administra a quantidade necessária de combustível. Isso evita que o sistema de alimentação injete combustível no distribuidor, centralizado, acarretando distribuição não igualitária;
- controle preciso da mistura. Os sistemas de injeção de combustível administram continuamente uma mistura ar e combustível precisa, independentemente das condições operacionais do automóvel. Isso proporciona melhor dirigibilidade, economia e controle de emissões;
- melhor resposta ao acelerador e despacho de potência. Pela injeção direta sobre a válvula de admissão o duto de admissão pode ser otimizado de forma a maximizar o aporte de ar no cilindro, o que melhora o torque e resposta ao acelerador;

- para evitar a perda de combustível durante a lavagem. Em motores de dois tempos ou de quatro tempos super-carregados pode haver a perda de combustível pela válvula de escape. Embora a “lavagem” pela penetração do jato de líquido ser aceitável e até recomendável na válvula de admissão, para a sua refrigeração, na válvula de escape isso é indesejável, pois acarreta perdas importantes de combustível. Para evitar-se tal efeito deve-se injetar o combustível no momento em que as válvulas de escape já estejam fechadas. Novamente a injeção eletrônica permite um melhor controle desse fenômeno;

- reduzir ou eliminar a detonação prévia.

Nesse caso o controle de ponto exato de injeção passa a ser administrado pelo sistema de controle. Em carros mais modernos esse controle é exercido pelo módulo eletrônico de injeção de combustível. A injeção retardada pode ser usada para evitar a detonação em momento indesejado (“bater pino”). Para tal são necessários jatos de alta pressão, injetados próximo ao ponto morto superior, no curso de compressão;

Segundo grandes fabricantes de veículos e pesquisadores de motores há ainda consideráveis desafios a serem enfrentados no desenvolvimento de sistemas de injeção, conforme ensina Taylor (1995). Sobretudo as emissões poluentes em veículos, conforme menciona Lee (2007), guardam oportunidades de pesquisa e desenvolvimento, haja vista a forte relação entre o controle da mistura carburada e a geração de gases poluentes. São absolutamente necessários entretanto o entendimento dos fenômenos envolvidos e fundamentos da tecnologia de atomização para o sucesso desse objetivo. Autores como Lefebvre (1989) e Yule (1996) corroboram essa afirmação.

### 3.4. A IMPORTÂNCIA DA ATOMIZAÇÃO

O aumento da área de contato da corrente de combustível líquido, através da transformação do contínuo em gotículas é, portanto, o principal recurso de engenharia no propósito aumentar a taxa de vaporização do líquido e manter sobre controle a mistura com o ar. Lefebvre (1989) comenta que o processo de

atomização cumpre um papel fundamental, não somente em injetores para motores, mas nas mais diversas áreas da engenharia. Os principais campos de aplicação da atomização, segundo o autor, são:

- processos industriais: reatores, metais pulverizados, misturas gás e líquidos, resfriamento, secagem;
- tratamento de efluentes (proteção ambiental): umidificação; lavagem de gases; lavagem e secagem industrial;
- revestimento: tratamento superficial, aplicação de tintas e protetores; enchimentos e isolamentos, aplicação de partículas;
- combustão: queimadores, motores de combustão interna Otto e Diesel; caldeiras; fornos; turbinas a gás; foguetes;
- diversos: impressão a jato de tinta; administração de medicamentos, agricultura; aplicação de dispersantes químicos.

Na **agricultura**, por exemplo, o controle do diâmetro de gotícula, a velocidade e a geometria do spray permitem que a carga injetada atinja o solo ou folhas distintamente, com seletividade e melhor eficiência. Chigier (2003) comenta que com isso pode-se obter economia no uso de defensivos como inseticidas e fungicidas.

A **administração de medicamentos** líquidos por via oral também teve forte desenvolvimento com o desenvolvimento de atomizadores mais especializados, comentam Lefebvre (1989) e Chigier (2003). Um exemplo típico é o dilatador de brônquios para pacientes asmáticos. As chamadas “bombinhas” são na verdade atomizadores mecânicos com dosagem controlada da medicação. Permitem uma administração rápida e com uma distribuição de gotículas aerodispersóides capazes de atingir as vias respiratórias inferiores, até os alvéolos pulmonares. A mesma tecnologia, que explora o binômio dosagem - tamanho de gota, está em testes nos EUA para administração de insulina em pacientes diabéticos, livrando do incômodo da injeção convencional com agulhas.

Mas uma das principais aplicações da atomização é a conversão de combustíveis líquidos em máquinas térmicas, de forma geral e, especialmente, em turbinas aéreas e motores de combustão interna (MCI). Lefebvre (1989) ensina que as máquinas a ciclo Diesel e Otto são dependentes de uma efetiva atomização para aumentar a área de contato e com isso atingirem altas taxas de mistura e vaporização. Além disso, nestes sistemas a redução do diâmetro de gotas

proporciona altas taxas de dissipação de calor volumétricas, ignição mais fácil e uma menor emissão de poluentes, conforme mencionam Rink e Lefebvre (1986) e Lee (2007).

Yule (1996) **define atomização** como a ação de instabilização e quebra do contínuo líquido, ou seja, a ruptura da superfície contra as tensões superficiais e a dissipação de energia através das forças viscosas, transformando a corrente líquida em filmes e ligamentos instáveis, gotas e finalmente gotículas.

Lefebvre (1989), por sua vez, **define atomização** mais detalhadamente, sob a ótica da mecânica dos fluidos. Trata-se de um distúrbio causado por forças internas e externas sobre a tensão superficial consolidada. Na ausência de tais perturbações a tensão superficial tende a “puxar” e reconstituir o líquido para forma da esfera, uma vez que esta tem a menor energia superficial. As forças viscosas, por sua vez, se opõem a qualquer mudança na geometria do sistema. Contrariamente, forças aerodinâmicas agem sobre a superfície do líquido e podem promover rupturas sobre o fluido. A quebra do contínuo líquido ocorre quando a magnitude das forças de ruptura supera a força de tensão superficial. A continuação das rupturas gera, macroscopicamente, gotas e gotículas.

O conjunto de gotículas em deslocamento segundo uma orientação específica, em determinada região do espaço, é **denominado de spray**. O aumento da superfície de contato é dado pela somatória das áreas superficiais de cada gota e gotícula. Trata-se, portanto, de um recurso simples e muito eficaz na interação das correntes.

O processo de atomização, entretanto, demanda controle. Neste contexto o conhecimento dos mecanismos envolvidos na transformação do líquido é indispensável para que o processo possa ser convenientemente explorado.

Em síntese, autores como Lefebvre (1989), Taylor (1995) e Chigier (2003) comentam que a atomização de combustíveis é essencial quando se busca o controle das principais características de injeção em motores como:

- **controle da taxa de vaporização;**
- **distribuição da vazão;**
- **penetração das gotas,** através de sua quantidade de movimento.

Tais características estão associadas a uma série de elementos que vão desde a geometria do atomizador às condições operacionais do processo. Pode-se então detalhar:



O **controle da taxa de vaporização** em sistemas de injeção por sprays está relacionado com o diâmetro das gotículas, as propriedades do líquido, do meio gasoso e finalmente dos fenômenos de transporte envolvidos, sobretudo quantidade de movimento. Tem especial interesse, obviamente, a zona de mistura do spray com o ar.

A **distribuição de vazão de líquido** por sua vez permite que as massas de líquido e ar fiquem uniformemente misturadas, evitando-se altas concentrações de combustível em certas zonas do coletor de admissão e falta de líquido em outras. De forma geral esse recurso traduz-se simplesmente no posicionamento do orifício de descarga e a geometria do spray em relação ao fluxo de ar, de forma a preparar a mistura uniformemente e ao tempo correto.

Finalmente a **penetração das gotículas** cumpre outro importante papel que é manter certa quantidade de líquido, ainda não totalmente vaporizado, nas imediações da válvula de admissão do cilindro. Com isso o spray exerce uma segunda função: a de manter lubrificados e refrigerados as sedes de válvulas e cabeçote do motor. A penetração das gotículas esta ligada naturalmente a sua quantidade de movimento, ou seja a massa líquida da gotícula, relacionada com seu diâmetro, e sua velocidade.

O processo de atomização, apesar de aparentemente simples, tem um mecanismo complexo e depende de muitos fatores segundo ensina Lefebvre (1992). A desintegração do líquido está relacionada a parâmetros de fluxo, particularmente os que se referem à integração das correntes além de suas propriedades físicas. As principais características de fluxo estão vinculadas a pressões e vazões, encerradas em uma geometria definida do injetor. Além disso, Lefebvre (1992) recomenda que se deva também considerar a espessura inicial do filme e a características da turbulência gerada.

Sabe-se que em muitos processos a geração de gotículas demasiadamente pequenas em zonas de mistura com o ar ou ainda muito turbulentas pode levar a altas taxas de vaporização e com isso pequenos tempos de duração da gota em fase líquida. Em outras palavras o tempo de vida da fase líquida pode ser controlado pela ação sobre o diâmetro e velocidade, ambas são características relacionadas com o processo de atomização.

### 3.4.1 Tipos de atomizadores – Uma breve descrição

Os atomizadores utilizados em injetores de combustível são, em sua grande maioria, atomizadores mecânicos, mais especificamente mecânicos centrífugos, como os utilizados como objeto deste trabalho. Existem, naturalmente, muitos outros tipos de atomizadores disponíveis na engenharia e serão vistos resumidamente a seguir. Os dispositivos são agrupados principalmente segundo o princípio de atomização ou mesmo conforme sua função específica. Autores como Lefebvre (1992) e Yule (1996) propõem uma classificação segundo seis grandes “famílias”, a saber:

#### 3.4.1.1 Atomizadores mecânicos

Geram perturbação ao líquido devido à passagem através de um orifício especialmente projetado para a geração da turbulência necessária. O fluxo é causado pela diferença de pressões a montante-jusante do orifício. São os atomizadores mais comuns, empregados em várias atividades que vão desde a agricultura, combustão até uso doméstico como aplicadores de inseticidas e produtos de higiene e perfumaria. Na indústria estão presentes em queimadores para combustíveis líquidos mais leves como diesel e óleos combustíveis pouco viscosos. Os atomizadores mecânicos podem ser divididos ainda em dois subgrupos:

- o “**simplex**” em que o líquido, na zona imediatamente a montante do orifício, tem um perfil de velocidades eminentemente axial, paralelo ao eixo do atomizador (e do orifício) e;
- o “**mecânico-centrífugo**” em que o líquido possui uma segunda componente de velocidade, perpendicular ao fluxo, normalmente tangencial, de forma que ao passar pelo orifício acaba se distanciando do eixo principal por efeito centrífugo. Tal efeito é conseguido com o uso de difusores estáticos ou ranhuras usinadas à montante do orifício. Esse atomizador é dos mais empregados em

engenharia e está presente nos sistemas de injeção de motores, objeto deste trabalho. Permitem a formação de um spray cônico (vazio ou cheio) com ângulo de vértice controlado.

#### 3.4.1.2 Duplo-fluido

Estes dispositivos empregam como princípio de atomização a transferência de quantidade de movimento entre um fluido atomizador (auxiliar) e o líquido a ser atomizado. O fluido atomizador, normalmente um gás em alta velocidade, é acelerado através de bocais e colocado em rota de colisão com o fluxo líquido. Como resultado da interação das correntes, por efeito de pressão dinâmica do fluido atomizador e com o uso de uma geometria adequada, tem-se a geração de zonas de ruptura da tensão superficial, dando origem ao spray conforme ensinam Lefebvre (1989), Yule (1996) e outros autores como Chigier (2003) e Souza (2002). São atomizadores bastante usados em queimadores industriais devido à disponibilidade de vapor ou ar comprimido como fluido auxiliar.

#### 3.4.1.3 Rotativos centrífugos

Esses atomizadores operam segundo efeito centrífugo causado dinamicamente pela rotação de uma superfície (tipo prato ou copo cônico) em que o líquido se desloca, causando espalhamento. O movimento do copo é conseguido normalmente pelo uso de motores elétricos com transmissão por polias e correias. Têm uso como atomizadores de combustíveis em caldeiras e fornos, porém em menor proporção do que os mecânicos.

#### 3.4.1.4 Efervescentes

Os atomizadores efervescentes formam um grupo especial de dispositivos derivados dos de duplo-fluido. Operam com um fluido auxiliar gasoso, misturado com o líquido à montante do orifício de descarga, através de meios porosos ou semi-porosos. Com a queda de pressão estática, através do orifício de descarga, o gás se expande rapidamente no líquido, gerando forças de bolha, acima da tensão superficial. Esta perturbação se encarrega de quebrar o contínuo, gerando gotículas. São dispositivos de uso muito específico devido à sua baixa tolerância à variabilidade das propriedades do líquido e gás atomizador.

#### 3.4.1.5 Eletrostáticos

São atomizadores que operam pelo carregamento elétrico do líquido a ser atomizado segundo um campo elétrico. As cargas de mesmo sinal se repelem gerando uma força oposta à tensão superficial, gerando uma força elétrica na superfície do líquido. Quando esta supera a tensão superficial inicia-se o processo de quebra do contínuo, gerando gotículas. Sua utilização na indústria é específica, normalmente para pintura.

#### 3.4.1.6 “Exóticos”

Autores como Yule (1996) tratam esses atomizadores como “exóticos” devido aos princípios de atomização não-convencionais como o ultra-sônico (apitos), de impacto e os piezo-elétrico. Sua aplicação na indústria é restrita, mas encontra espaço na atividade de administração de medicamentos como pulverizadores para tratamento de asma e inalação.

Embora atualmente ainda sejam classificados como “exóticos” um tipo específico desses atomizadores vêm criando um novo grupo, conforme ensina Chigier (2003). As demandas por formas de injeção de medicamentos menos agressivas, por via respiratória em substituição a injeção intramuscular (agulhas), criou os atomizadores de medicamentos.

### 3.5 ELEMENTOS DA TEORIA DA ATOMIZAÇÃO APLICADA A INJETORES

Para que se possa aprofundar os estudos e experimentos sobre bicos injetores é indispensável a compreensão do spray gerado pelo atomizador tipo mecânico centrífugo. Os fenômenos envolvidos nas partes internas e externas determinam a características e morfologia do spray objeto deste trabalho. Os itens a seguir trazem os elementos necessários ao entendimento e o equacionamento do spray à luz da Mecânica dos Fluidos.

#### 3.5.1 Morfologia de spray cônico oco

Todo spray possui uma morfologia típica que classifica suas regiões e os corpúsculos presentes em cada uma delas. As regiões são definidas segundo o estado de instabilidade do líquido durante o processo e sua posição relativa ao orifício de descarga. A compreensão dos fenômenos envolvidos em cada fase e região do spray é essencial ao equacionamento do fluxo de líquido. A figura 8 apresenta uma foto convencional de um spray gerado por um injetor de sistema MPFI, utilizado neste trabalho.

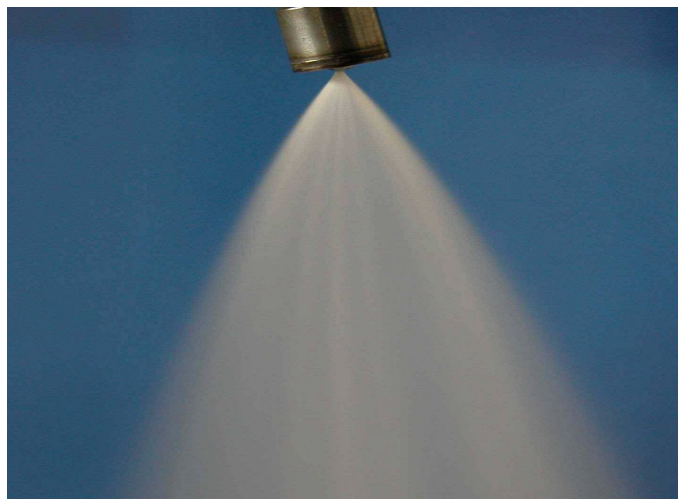


FIGURA 8 – SPRAY GERADO POR INJETOR MECÂNICO-CENTRÍFUGO

O dispositivo é um atomizador mecânico centrífugo com ranhuras internas que imprimem uma velocidade angular ao líquido que, imediatamente após o orifício de descarga, se transforma em velocidade radial, por efeito centrífugo, propiciando a abertura do cone oco. A figura 9, por sua vez, apresenta um esquema típico de atomizador e spray em corte, associados ao bico injetor da figura anterior.

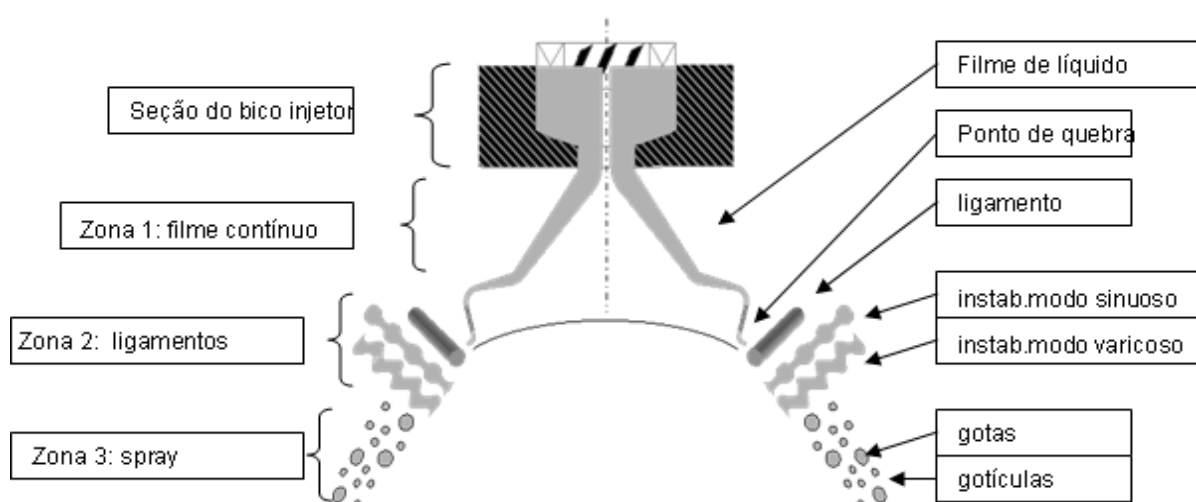


FIGURA 9 – GEOMETRIA TÍPICA DE SPRAY DE CONE OCO

A caracterização das zonas é absolutamente necessária ao estudo de sprays desse trabalho, a saber:

- seção do bico injetor: corresponde à parte imediatamente à montante do orifício de descarga. É formada pela câmara de giro, agulha obturadora e a sede de contato sobre o orifício. As paredes internas são usinadas com ranhuras helicoidais destinadas a imprimir uma velocidade angular ao líquido. Na passagem, o líquido ganha velocidade tangencial, que resulta no spray cônico oco.
- zona 1: corresponde à formação do filme de líquido, de formato cônico, à jusante do orifício de descarga. Pela equação da continuidade pode-se observar o afinamento da espessura do filme à medida que se afasta da descarga. Este atinge um valor limítrofe, com instabilidade de quebra devido a forças de tensão superficial. Ocorre então a ruptura do filme, culminando com a formação de ligamentos. A distância entre a descarga e o primeiro ponto de quebra é um importante parâmetro em atomização, denominado comprimento de quebra  $L_b$ ;
- zona 2: logo à jusante da zona 1, surgem os ligamentos instáveis, originários da quebra do filme. Os ligamentos mantêm um “movimento” ondulatório caracterizado por dois modos predominantes de vibração, o modo sinuoso e o varicoso, conforme mencionam Lefebvre (1989) e Mitra (1999);
- zona 3: formação de gotas e gotículas. Os ligamentos instáveis, pelos modos predominantes mencionados anteriormente, rompem-se no sentido longitudinal originando gotas e gotículas.

### 3.5.2 Características do spray cônico oco

Conforme descrição anterior as principais características que definem um spray, segundo Lefebvre (1989), são: o ângulo de cone  $\alpha$ , comprimento de “quebra” ( $L_b$ ), o diâmetro de gota ( $d_g$ ), a velocidade de gota ( $U_g$ ) e o número de fluxo do atomizador (FN). O entendimento desses parâmetros é essencial para o estudo dos fenômenos envolvidos e indispensável à proposta dessa tese.

### 3.5.2.1 Ângulo de cone do spray ( $\alpha$ )

Uma das principais características do spray cônico é seu ângulo de abertura ( $\alpha$ ). É determinado pela região limítrofe do fluxo divergente e o gás periférico, com vértice no orifício de descarga. O ângulo de cone  $\alpha$ , mostrado na figura 10 é originário da componente radial de velocidade, após a descarga do injetor.

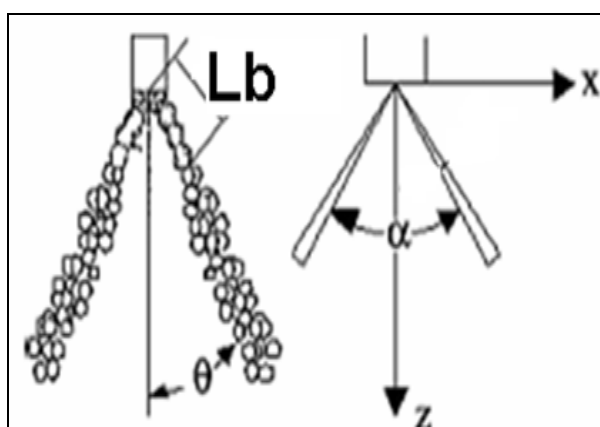


FIGURA 10 – ÂNGULO DE CONE E COMPRIMENTO DE QUEBRA  $L_b$

Essa componente é gerada à montante do orifício de descarga devido a rotação do fluxo líquido. Esse efeito, essencial no atomizador centrífugo, pode ser obtido por câmaras de rotação “swiller” com entradas de líquido tangenciais ou ranhuras helicoidais, especialmente usadas no interior do atomizador.

### 3.5.2.2 Comprimento de quebra $L_b$

O comprimento de quebra corresponde à distância entre o orifício de descarga até a zona de ruptura do filme, dando origem aos ligamentos. Trata-se de um importante parâmetro em atomização. As figuras 10 e 11 apresentam respectivamente o comprimento de quebra  $L_b$  esquemático e em uma foto de alta velocidade, tirada durante os ensaios, base deste trabalho.



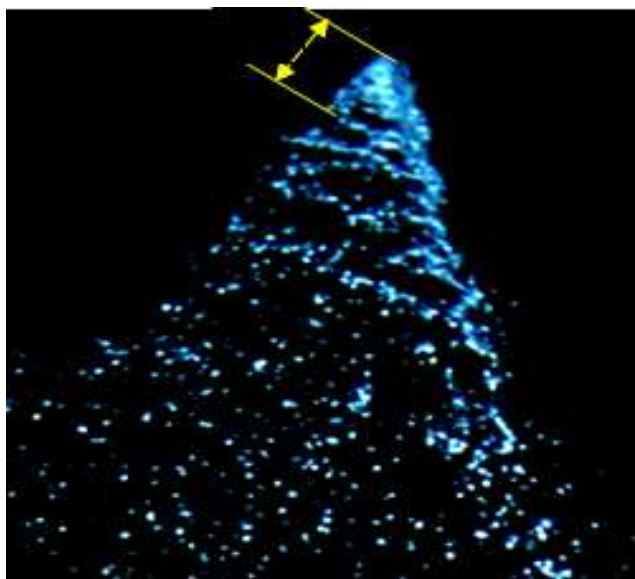


FIGURA 11 – COMPRIMENTO DE QUEBRA - FOTO DE ALTA VELOCIDADE

### 3.5.2.3 Diâmetro representativo de um spray $d_g$

Considerando que o spray oriundo de um atomizador, independentemente de seu tipo, é formado por um universo de gotas e gotículas com grande variabilidade de diâmetros o tratamento estatístico de gotículas é obrigatório. Sabe-se que os diâmetros de gotículas de um spray não perturbado apresentam-se segundo uma distribuição estatística similar à normal (ou Gaussiana), conforme comenta Lefebvre (1989). O autor ensina, contudo, que a grande maioria de sprays utilizados em engenharia raramente tem uma distribuição de diâmetros muito uniforme. A representação discreta do diâmetro das gotículas presentes em um spray passa, portanto por um critério de cálculo dando origem ao conceito de diâmetro representativo. De fato toma-se uma determinada região do spray para estudo e aplica-se o conceito de média estatística.

Segundo Tate (1982), pelo fato do diâmetro representativo de uma população de gotículas originar-se de uma abordagem estatística, há uma grande variedade de métodos de cálculos que podem ser empregados. Conseqüentemente uma mesma população pode apresentar diferentes valores

discretos de diâmetro representativo. A melhor escolha está ligada ao tipo de aplicação e avaliação que se deseja fazer do spray. Mugele e Evans (1951) propuseram vários critérios de cálculo do valor de “ $D_{pq}$ ”, como se segue na equação 3.1:

$$D_{pq} = \left\{ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^p n(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^q n(D) dD} \right\}^{\frac{1}{(p-q)}} \quad (3.1)$$

Em que  $dg = D_{pq}$  é o diâmetro representativo de uma população de gotículas com vários diâmetros, calculado segundo um critério que define os valores dos expoentes “p” e “q”. Deve ser aplicado a uma população de gotículas com  $n$  o número de gotículas com determinado diâmetro  $D(n)$ . Os autores ainda apresentam a Tabela 1, abaixo, com os valores de “p” e “q” praticados no estudo de sprays, ou seja:

p	q	Nomenclatura	Aplicação mais freqüente
1	0	Linear, aritmético	Poluentes, evaporação
2	0	Superfície	Absorção
3	0	Volume	Hidrologia
2	1	Diâmetro superficial	Absorção
3	1	Diâmetro volumétrico	Evaporação
3	2	Diâmetro de Sauter (SMD)	Eficiência, transferência de massa, combustão
4	3	Diâmetro de Brouckere	Equilíbrio de combustão

TABELA 1 - ÍNDICES PARA CÁLCULO DO DIÂMETRO REPRESENTATIVO  
Fonte: MUGELE; EVANS (1951)

Segundo Tate (1982), Lefebvre (1989) e Rawle (1992) a representação discreta mais utilizada em estudos de sprays, com especial interesse em

transferência de massa e combustão, é o diâmetro  $D_{32}$  ou o diâmetro representativo de Sauter-SMD, apresentado na equação 3.2:

$$D_{32} = \text{SMD} = \left\{ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 n(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^2 n(D) dD} \right\} \quad (3.2)$$

Lefebvre (1989) esclarece que nenhum diâmetro representativo pode completamente definir uma distribuição de gotículas em um spray, tampouco existe uma relação universal entre um diâmetro representativo e a sua distribuição. Valem naturalmente demais informações típicas de distribuição como o conceito de menor e maior partícula, dispersão, média aritmética simples  $D_{10}$ , moda e outras características. Para este trabalho a medida a ser observada é o SMD ( $D_{32}$ ) que será utilizado no modelo de correlação de diâmetros e o diâmetro médio  $D_{10}$  para comparações.

#### 3.5.2.4 Velocidade das gotas $U(x, y, z)$

Outra importante característica de um spray é seu campo de velocidades. Os fenômenos de transferência de massa e quantidade de movimento estão intimamente ligados à velocidade dos corpúsculos em movimento. Além disso, a penetração das gotículas em um meio gasoso, como no processo de formação de mistura carburada, tem naturalmente relação direta com sua velocidade. Em um spray, entretanto, existem milhares, até milhões de gotículas fluindo, cada uma com seu diâmetro e velocidade. O estudo de sprays trata não somente uma velocidade em especial, mas um campo de velocidades. Na figura 12 pode-se observar uma foto convencional de um spray objeto deste estudo. O ponto P de coordenadas locais  $x, y, z$ , com referência a um sistema cartesiano com origem no ponto de descarga do orifício de um atomizador. Neste ponto fixo passam gotículas com diferentes velocidades e diâmetros.

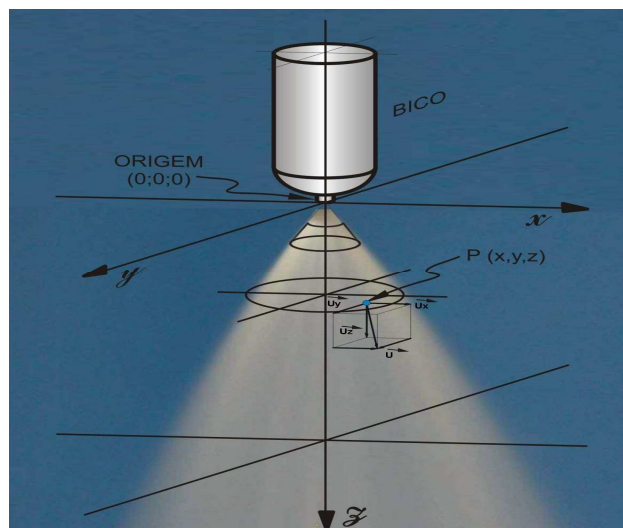


FIGURA 12 - SPRAY – PONTO P (X,Y,Z)

Assumindo-se um volume de controle de dimensões muito pequenas em relação ao spray, localizado no ponto  $P(x, y, z)$ , é possível fazer as seguintes abordagens:

- temporal, em que se observa a variação da velocidade ao longo do tempo em um determinado ponto do espaço;
- dimensional, em que se verifica a velocidade predominante (ou média) das gotículas que passaram em um ponto (um volume de controle) localizado em uma região do spray, com coordenadas definidas  $P(x, y, z)$ .

Considerando uma abordagem Euleriana, tem-se que a velocidade é uma propriedade do escoamento como função do espaço e tempo. Assim a velocidade é expressa como  $U = U(x, y, z, \text{tempo})$  em determinado instante. Desprezando-se a dependência do tempo, considerando que este estudo assume somente o spray em regime de fluxo, então  $U = U(x, y, z)$ . Surge então um campo de vetores velocidade, com as 3 componentes, com vínculo dimensional. Na verdade pelo ponto de coordenadas  $P(x, y, z)$  passa uma população de gotículas com uma determinada velocidade. O estudo de sprays considera uma média dessas velocidades, contadas segundo um método de medição dentro de um período de varredura. No capítulo 4 – Métodos e Materiais, as técnicas de medição de velocidades utilizadas nesse trabalho serão mais bem explicitadas.

### 3.5.2.5 Número de fluxo (FN)

Além das características anteriores, é usual o cálculo de outra importante característica de um atomizador, denominada número de fluxo. Segundo Lefebvre (1989) o número de fluxo  $F_n$  é definido como a relação entre a vazão mássica e a raiz quadrada do produto da pressão diferencial (ou queda de pressão) no orifício e a densidade do líquido. O número de fluxo será mais bem abordado no capítulo 4.

$$F_n = \frac{\dot{m}_L}{\sqrt{\Delta P \cdot \rho_L}} \quad (3.3)$$

## 3.6 ATOMIZADORES PARA INJETORES- ESTADO DA ARTE

Os injetores para motores de combustão interna podem ser definidos mecanicamente como válvulas eletro-comandadas associadas a atomizadores. O dispositivo na verdade compreende várias partes, classificadas segundo sua função, a saber: conexão de entrada de combustível, corpo, solenóide e seus eletrodos, obturador e atomizador. A figura 13 mostra o desenho do injetor utilizado neste trabalho, em corte longitudinal.

O atomizador propriamente dito é o elemento dedicado à geração do spray, localizado na parte inferior incluindo a câmara de líquido, câmara de centrifugação, obturador (tipo agulha ou esfera), sede e orifício de descarga. Os atomizadores mais freqüentemente usados em injetores são do tipo mecânicos-centrífgos com spray cônico oco, conforme a figura 14. Não são raros, entretanto, os injetores do tipo mecânico simples, que geram spray do tipo cone sólido, com diferentes ângulos de cone.

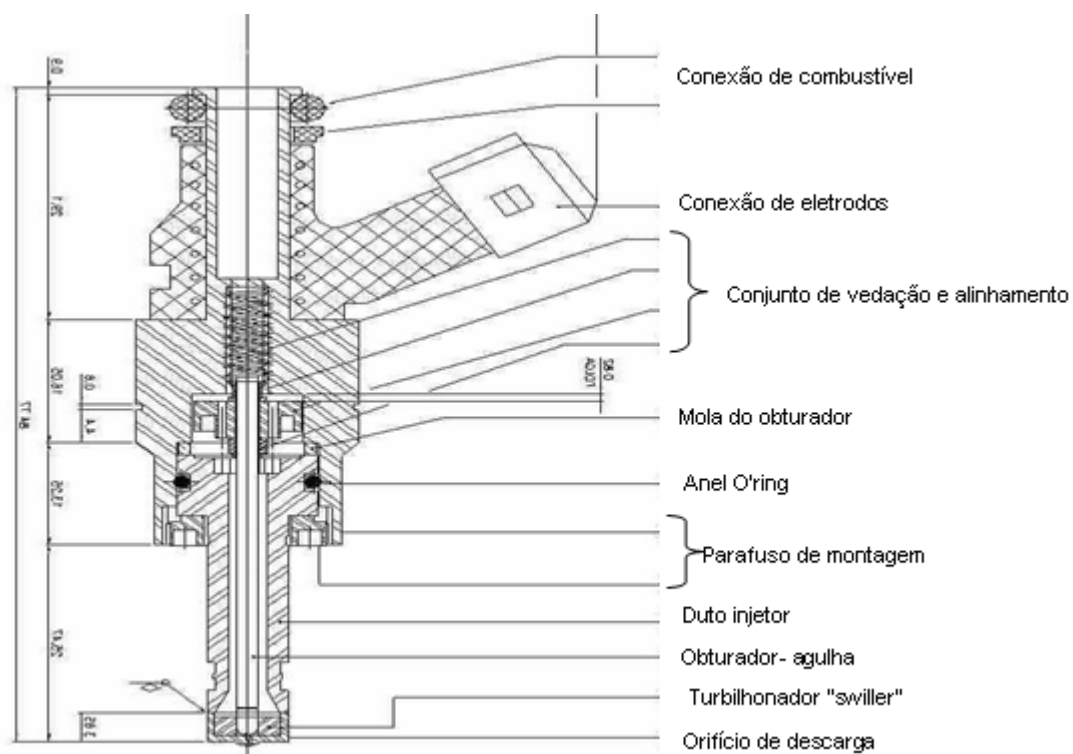


FIGURA 13 – INJETOR – CORTE LONGITUDINAL

Autores como Schmidt et al. (1999) e pelo menos outros 10 trabalhos pesquisados assumem os injetores comuns para motores como dispositivos com atomizador do tipo mecânico-centrífugo. A geometria interna é especialmente elaborada para que haja uma rotação do fluido antes da descarga, originando o cone, conforme a figura 14.



FIGURA 14 – SPRAY DE INJETOR – FOTO CONVENCIONAL

O emprego desse tipo de atomizador em injetores de combustível é justificado por Chryssakis et al. (2003). O autor menciona como principal vantagem do spray cônico oco a grande relação entre a área por volume associado a uma boa qualidade de atomização e distância de penetração adequada. Por tratar-se de um tipo convencional, que equipa a grande maioria de motores à centelha no Brasil e no mundo, esse tipo de injetor foi selecionado como objeto dessa tese.

É importante considerar que a metodologia proposta nesse trabalho é também válida para quaisquer injetores que utilizam atomizadores mecânicos centrífugos. Esses dispositivos são amplamente utilizados em máquinas de combustão interna, como motores Diesel e Otto, turbinas a gás do tipo aéreas, de serviço pesado e aero - derivadas para geração de energia elétrica. Além disso, tais atomizadores são também utilizados em queimadores industriais para fornos e caldeiras.

### 3.6.1 Modelos de atomização de sprays de Cone Oco

Os estudos para o aperfeiçoamento de injetores têm forte apelo técnico-científico, conforme mencionado no capítulo 2, devido aos benefícios energéticos e ambientais na aplicação em motores. Embora tal motivação seja notória, a quantidade de trabalhos disponíveis na literatura especializada, que se valeram da experimentação como abordagem básica do estudo, não é abundante. Da mesma forma, as abordagens baseadas em simulações computacionais também deixam a desejar, devido a imprecisões na modelagem do fenômeno, fortemente não-conservativo, levando os pesquisadores a elegerem uma metodologia com ajuste experimental como mais confiável e produtiva. Apresenta-se a seguir um apanhado geral sobre os principais modelos de correlação teórico-experimental disponíveis na literatura.

Um dos primeiros trabalhos, reconhecido como o mais importante sobre o equacionamento do spray na zona de descarga, foi feito por Lefebvre em 1989. O autor fez uma coletânea dos estudos disponíveis na época. Em análise dos elementos morfológicos do spray, à luz da mecânica dos fluidos, observa-se que,

em comum, um dos principais desafios dos pesquisadores era a determinação da espessura do filme  $t_0$  na descarga do atomizador. O efeito centrífugo é proporcionado pela velocidade angular do líquido na câmara de giro, à montante do orifício. Na descarga a rotação do líquido provoca o aparecimento do núcleo de ar, o fluxo torna-se anular e com isso ocorre uma forte queda no coeficiente de descarga. Na figura 15 apresentam-se os principais elementos da morfologia do spray a serem considerados no equacionamento físico.

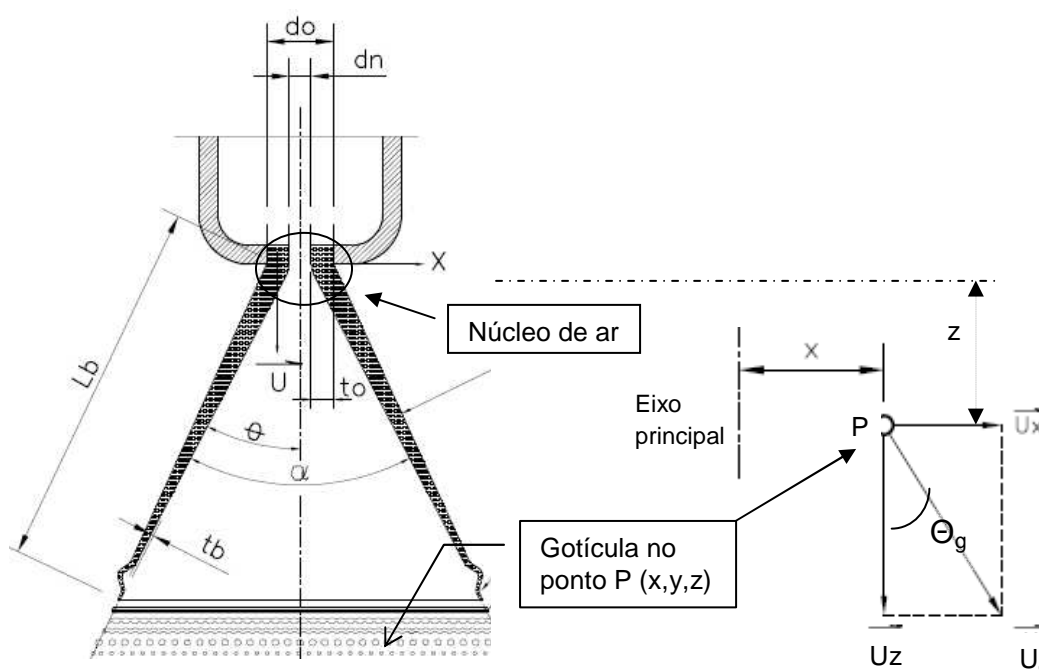


FIGURA 15 - ELEMENTOS DO SPRAY DE CONE OCO

Em 2003 Chrysakakis e co-autores fizeram uma revisão abrangente sobre os principais trabalhos em atomizadores mecânicos centrífugos. O autor constata que os modelos ainda são escassos e poucas alternativas surgiram desde então.

Uma dessas novas contribuições na modelagem do filme foi publicada em 1995 por Dorfner et al. O modelo foi aprimorado mais tarde, em 1997, por Han et al. Em 1999 surge a abordagem de Atomização da Lâmina por Instabilidade Linearizada (LISA) de Schmidt et al. Tal abordagem está presente em alguns programas computacionais de simulação de injetores.

Em comum, esses três modelos estimam as características básicas do filme de líquido formado nas vizinhanças do injetor e utilizam essas estimativas para a predição das características do spray tais como o tamanho das gotículas resultantes e suas velocidades. O autor afirma que a comparação das predições



dos três modelos em uma faixa ampla de pressões mostra pequenas diferenças relativas entre eles.

A disponibilidade desses modelos mostra os dois caminhos atualmente utilizados para a predição do tamanho de gota e sua velocidade, ou seja: a modelagem teórica e o levantamento de relações empíricas. O modelo LISA explora a ondulatória da superfície da lâmina que antecede a formação da gota, ou seja, a instabilidade do filme na zona de quebra (zona 2 da figura 9). A abordagem é mais física e menos dependente de constantes empíricas. Como desvantagem, entretanto, o modelo LISA não considera efeitos do pré-spray nem tampouco o efeito da centrifugação na descarga do injetor.

No mesmo trabalho, Chryssakis et al. (2003) apresenta um modelo próprio para sprays gerados em injetores centrífugos operando em alta pressão. Este modelo mescla as equações do LISA e incorpora relações empíricas também. A seguir esses modelos, disponíveis na literatura, serão apresentados.

#### 3.6.1.1 O modelo de Chryssakis et al.

O modelo apresentado por Chryssakis et al. (2003) aborda o rompimento primário do filme baseado no modelo LISA, com algumas extensões. De acordo com o modelo original, a espessura do filme de líquido “ $t_0$ ”, formado na saída do orifício, é calculada a partir da continuidade, apresentada na equação 3.4:

$$\dot{m}_L = \pi \cdot \rho_L \cdot U_z \cdot t_0 \cdot (d_0 - d_n) \quad (3.4)$$

Onde  $\dot{m}_L$  é o fluxo mássico de combustível,  $d_0$  é o diâmetro do orifício de descarga,  $\rho_L$  é a densidade do combustível e  $U_z$  a componente axial da velocidade na saída do orifício, calculada pela equação 3.5:

$$U_z = U \cdot \cos \theta \quad (3.5)$$

Onde  $\theta$  é o semi-ângulo do spray e  $U$  é a velocidade relativa entre o

combustível e o ar (figura 12), assumida como sendo igual à velocidade do líquido uma vez que o ar é considerado inicialmente imóvel à seguir, na equação 3.6.

$$U = C_D \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_L}{\rho_L}} \quad (3.6)$$

Onde  $C_D$  é o coeficiente de descarga do orifício e  $\Delta p_L$  a diferença de pressão entre a linha de combustível e o ambiente. No trabalho, a equação (3.6) foi utilizada apenas nos casos em que o perfil de velocidades não foi medido experimentalmente. Naqueles casos os autores utilizavam coeficientes de descarga obtidos experimentalmente.

Pode-se observar também que na equação 3.4 Chrysakakis et al. (2003) precisou medir o diâmetro do núcleo de ar “ $d_n$ ” e das outras variáveis de forma a calcular  $t_0$ . Esta medição é difícil de ser efetuada, segundo os próprios autores, pois necessita de intrusão de medidores na região do orifício de descarga. Os próprios autores recomendam evitar a medição e utilizar modelos de cálculo da espessura do filme  $t_0$ . Tais modelos, que foram utilizados nesta tese, serão apresentados no item 4.4.7.

A seguir serão apresentados outros modelos da literatura para o cálculo do comprimento de quebra  $L_B$ .

### 3.6.1.2 O modelo de Han e Reitz

No modelo de Han e Reitz, o rompimento da lâmina de líquido é estudada com base na análise de estabilidade de uma onda sinuosa na lâmina cônica. Uma equação apropriada, que calcula o comprimento de quebra,  $L_B$  (figura 10), pode ser deduzida como:

$$L_B = B \cdot \sqrt{\frac{\rho_l \cdot \sigma \cdot t_b \cdot \cos \theta}{\rho_g^2 \cdot U_r^2}} \quad (3.7)$$

Onde  $B$  é uma constante,  $\rho_g$  a densidade do gás ambiente,  $\sigma$  a tensão

superficial do líquido,  $t_b$  a espessura no ponto de quebra e  $U_r$  é a velocidade radial, relativa lâmina/ gás.

### 3.6.1.3 O modelo de Nagaoka e Kawamura

O jato de líquido saindo do injetor é tratado como uma lâmina de líquido até que este atinja o seu comprimento de quebra. A lâmina é analisada discretizando-se seu volume em pequenas quantidades e aplicando-lhes a equação de conservação da quantidade de movimento:

Onde  $\theta$  é o semi-ângulo de cone do spray e  $t_0$  representa a espessura da lâmina na saída do injetor. O comprimento de quebra é avaliado por meio da seguinte equação:

$$L_b = \frac{18 \cdot \sqrt{2}}{F} \cdot \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \cdot \frac{t_0}{\sqrt{We_h}} \quad (3.8)$$

Onde  $We_h$  é definido como o número de Weber do ligamento e  $F$  é a razão entre a amplitude das ondas de pressão que surgem em escoamento viscoso sobre àquela em um escoamento invíscido.

Em todos os modelos apresentados, direta ou indiretamente, faz-se necessário conhecer a espessura da lâmina de líquido. Seja na zona de descarga ( $t_0$ ) ou próximo no ponto de quebra ( $t_b$ ) o cálculo ou medição da lâmina tornou-se um desafio para os pesquisadores. No capítulo 4 serão apresentadas correlações entre a geometria do atomizador, coeficiente de descarga e espessura da lâmina na descarga ( $t_0$ ), segundo os principais trabalhos disponíveis na literatura.

### 3.7 A EXPERIMENTAÇÃO NO ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE INJETORES

O desenvolvimento de atomizadores, de forma genérica, passa inevitavelmente pela experimentação. Segundo Mitra e Xianguo (1999), por tratar-se de fenômeno complexo, a predição do diâmetro representativo e outras características do spray através de abordagens simplesmente teóricas é difícil e rara na literatura. Inclusive a simulação total da zona de interação entre o líquido e o gás e subseqüentemente o processo de atomização por meios da fluidodinâmica computacional (CFD), está na fronteira do conhecimento. Com efeito, a pesquisa desses fenômenos deve explorar a experimentação e, portanto, a avaliação do spray gerado macroscopicamente.

A abordagem experimental passa pelo levantamento das relações entre as grandezas envolvidas no processo e a característica do spray observada. Lefebvre (1996) menciona que as principais características de um spray dependem das propriedades do escoamento. Com efeito, segundo Ricou e Spalding (1961) a dinâmica do spray é governada pela quantidade de movimento do escoamento. Os autores mostraram que o comportamento de diferentes jatos é similar quando a quantidade de movimento e a velocidade de descarga são os mesmos. Essa constatação significa que é possível se estimar a velocidade do escoamento de um jato a uma distância  $L$  qualquer do ponto de descarga, equivalente ao jato original no orifício de descarga, mantendo-se a mesma quantidade de movimento.

Outro importante aspecto sobre a dinâmica é a densidade do gás do meio onde o spray é injetado, mais do que a pressão desse meio. Isso foi comentado por Lefebvre (1989) e mais recentemente por Naber e Siebers (1996) que testaram sprays injetados em dois diferentes meios gasosos com a mesma densidade, mas diferentes pressões, mostrando que o comportamento do spray foi exatamente o mesmo nos dois casos. Além de corroborar essas conclusões autores como Lefebvre (1989) e Yule (1996) listaram as principais propriedades do líquido que influenciam no diâmetro e velocidade das gotículas do spray. No que se refere ao líquido injetado também mencionaram a densidade, a tensão superficial e a viscosidade. Essas grandezas são indispensáveis em uma correlação, seja fruto de

experimentos ou do emprego das equações da mecânica de fluidos, quando se parte para a modelagem do spray.

Desantes (2005) menciona também as leis de escala em seu estudo sobre sprays de diesel. As leis apresentam relações adimensionais características estabelecendo a velocidade como variável dependente de um conjunto de variáveis independentes envolvidas, organizadas em grupos adimensionais. Essa abordagem é especialmente útil na construção de correlações e será explorada no capítulo 4.

Tão importante quanto o conhecimento dos fenômenos envolvidos no processo de atomização, as técnicas de avaliação de sprays são imprescindíveis para a pesquisa e desenvolvimento de atomizadores.

Existem várias técnicas de avaliação de sprays voltadas para a medição das gotas. Há técnicas intrusivas e não intrusivas, qualitativas e quantitativas que variam em precisão, custo e complexidade conforme menciona Souza (1998). A abordagem experimental depende em muito das técnicas a laser conforme menciona Souza (2003) em sua dissertação de mestrado.

Lefebvre (1996) ensina que o estudo de atomizadores teve um forte incremento no final da década de 70 com o aparecimento de técnicas não intrusivas de medição de partículas. Podem-se usar técnicas fotográficas convencionais e de alta velocidade, inclusive com iluminação à luz coerente (lasers). A aplicação e os objetivos determinam qual técnica pode ou deve ser utilizada.

As técnicas óticas têm como vantagem a não intrusão e por isso a não perturbação do spray, mantendo suas características, conforme comenta Souza (1998). Alguns equipamentos além de revelar o diâmetro representativo ainda retornam informações úteis sobre a velocidade das gotas usando o efeito Doppler em luz coerente, complementa Roisnam (2001).

Uma das técnicas mais utilizadas mundialmente, segundo Rawle (1992), para a medição do tamanho de gotículas de um spray, devido a sua precisão, custo mediano e principalmente por tratar-se de técnica não-intrusiva, é o espalhamento de raios laser de baixo ângulo ("*Low Angle Laser Light Scattering – LALLS*"). As técnicas não intrusivas tornaram-se praticamente obrigatórias, inclusive como validação e comparação com modelos de simulação no estudo de sprays.

Vallet, Burluka e Borghi (2001) desenvolveram um modelo de simulação de

sprays euleriano, utilizando equações derivadas da equação de Navier-Stokes, entretanto os resultados obtidos foram apenas encorajadores. Erros significativos foram observados quando o diâmetro de gotícula SMD, densidade de gotículas e fração volumétrica de líquido em um dado volume foram efetivamente medidos e cotejados com os resultados da simulação.

Venkatramam (2005) em seu estudo sobre sprays de injetores de motores diesel em ambiente similar ao do cilindro, sob pressão, também não reporta resultados animadores. No caso a simulação utilizou um modelo bifásico gás - líquido segundo uma abordagem Euleriana-gás e Euleriana-líquido (ELEG). Contudo os resultados quando comparados com medições não foram satisfatórios corroborando ainda mais a abordagem experimental.

O estado atual do conhecimento científico na área de atomização aplicada, levantada por esta pesquisa bibliográfica, permite e motiva uma incursão experimental mais profunda. Há, portanto, fortes indícios de que a abordagem experimental tem muito a contribuir no estudo de sprays, especialmente na disponibilização de ferramentas de engenharia, como correlações matemáticas que permitam prever o comportamento do spray de injetores de combustíveis em motores.

Os estudos feitos em atomizadores duplo fluido, na dissertação de mestrado do autor, se restringiram, na época, ao diâmetro das gotículas. A inexistência de recursos laboratoriais não permitiu o estudo da velocidade do spray. Contudo, a disponibilidade de medidores por efeito Doppler (LDV), que permitem a medição da velocidade do corpúsculo, tornou possível o aprofundamento dos estudos que culminaram com a presente proposta de correlações inclusive, para o campo de velocidades para injetores. Com base neste apanhado técnico-científico este trabalho busca tal objetivo pelo aprofundamento de conhecimentos em atomização.

## 4 MÉTODOS E MATERIAIS

A abordagem experimental, proposta neste trabalho, baseou-se na medição direta das variáveis envolvidas no processo de atomização e análises laboratoriais das propriedades dos líquidos testados. Nos itens a seguir serão apresentados os métodos experimentais empregados, o equacionamento físico e os materiais utilizados.

### 4.1 MÉTODOS DE ABORDAGEM

Para lograr os objetivos desse trabalho, descritos no capítulo 2, privilegiou-se a experimentação estatisticamente estruturada como meio a obtenção de correlações para a predição do tamanho de gotículas do spray assim como seu campo de velocidades. A metodologia adotada foi baseada em um aparato de ensaios dedicado que permitisse a formação de um banco de dados com as variáveis e parâmetros do processo. Na fase de análise dos dados buscou-se uma metodologia estatística que pudesse fornecer correlações com intervalos de confiança aceitáveis, haja visto que um dos principais objetivos do trabalho era a obtenção de uma ferramenta de engenharia efetiva. A metodologia baseou-se em uma abordagem simples, tipicamente empregada na engenharia experimental, ou seja, o trinômio:

*marco atual – metodologia – marco referencial.*

#### 4.1.1 Marco atual

A fixação do marco atual se deu pelo levantamento do estado da arte sobre injetores de combustíveis para motores, especialmente a parte dedicada à

atomização. Por sua vez os atomizadores escolhidos foram os tipicamente utilizados em injetores, ou seja, aqueles geradores de spray cônico por efeito centrífugo e de pressão.

#### 4.1.2 Metodologia

A segunda etapa “metodologia” caracterizou-se pela seleção dos caminhos de abordagem, sempre à luz das ciências fundamentais da engenharia. O levantamento do estado da arte permitiu vislumbrar a experimentação científica como a forma mais viável e adequada aos objetivos. Naturalmente este não é o único meio, mas, em tese, o mais adequado à obtenção de correlações estatisticamente confiáveis sobre o fenômeno da atomização em sprays.

A metodologia empregada, lastreada na experimentação, demandou a construção de aparatos que permitissem a medição dos parâmetros e variáveis envolvidos, características dos fluidos e finalmente o diâmetro das gotículas do spray e sua velocidade. Uma abordagem dessa natureza inevitavelmente exige a seleção de bicos injetores com geometria conhecida e finalmente a medição de propriedades dos fluidos e condições operacionais. A metodologia empregada consistiu resumidamente em:

- seleção das variáveis envolvidas no fenômeno;
- levantamento de relações adimensionais;
- projeto e montagem da bancada de ensaios;
- seleção de injetores e conhecimento das respectivas geometrias;
- elaboração do plano de ensaios;
- testes exploratórios;
- execução do plano de ensaios e formação do banco de dados;
- análise e redução dos resultados;
- conclusão das correlações e verificação.



#### 4.1.3 Marco referencial

Finalmente o marco referencial, ou seja, conseguir-se uma ferramenta de engenharia que permitisse a predição de duas das principais características do spray: o diâmetro significativo das gotículas e o campo de velocidades, características fundamentais do estudo de sprays, conforme tratado no capítulo 3.

#### 4.2 ANÁLISE DIMENSIONAL DE GRANDEZAS ENVOLVIDAS NO SPRAY

A metodologia empregada exigiu primeiramente o equacionamento dos fenômenos, objetivando as variáveis dependentes: diâmetro final da gotícula e seu campo de velocidades, em função de outros parâmetros característicos.

As grandezas envolvidas na quebra do líquido e formação das gotas são eminentemente fluidodinâmicas e por isso as propriedades físicas do líquido, condições operacionais e a geometria do injetor foram inter-relacionadas. Com efeito, segundo autores como Welty (1984) e Potter e Wiggert (2003) a maioria dos fenômenos da mecânica dos fluidos depende, de maneira complexa, de parâmetros da geometria e do escoamento.

A correlação das variáveis obtidas única e exclusivamente da experimentação é um processo trabalhoso, pois demanda uma extensa coleta de resultados, formação de uma base de dados e sua redução até a obtenção das relações. Com o emprego da análise dimensional, contudo, o número de variáveis a analisar torna-se reduzido. O teorema dos  $\pi$  de Buckingham, devido a Edgar Buckingham (1867-1940), enuncia a relação entre variáveis dimensionais, que se deseja estudar, com outras variáveis e parâmetros do processo, consolidados em *grupos adimensionais*, conforme mencionam Potter e Wiggert (2003) e Welty (1984).

Enunciando então: dado um problema físico no qual a variável dependente  $q_1$  é função de  $(n-1)$  variáveis independentes, pode-se expressar a relação entre elas de forma funcional como:

$$q_1 = f(q_2, q_3, q_4, \dots, q_n) \quad (4.1)$$

Em que  $f$  é uma função desconhecida. Considerando a função  $f$ , os  $n$  parâmetros podem ser agrupados em  $(n-m)$  razões independentes adimensionais, ou parâmetros  $\pi$ , que podem ser expressos de forma funcional por:

$$G(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \text{ ou ainda } \pi_1 = G_1(\pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) \quad (4.2)$$

Sendo que  $m$  é usualmente igual ao número mínimo de dimensões independentes, necessárias para especificar as dimensões de todos os parâmetros  $q_1, q_2, q_3, q_4, \dots, q_n$ .

O equacionamento adimensional de sprays demanda naturalmente o conhecimento das grandezas físicas envolvidas no fenômeno, lembrando que este estudo focou as correlações para diâmetro e velocidade das gotículas.

Considerações para a análise dimensional:

- injetor de sistema de injeção convencional;
- o injetor é um atomizador mecânico–centrífugo;
- geometria definida e comensurável;
- líquido principal e fluido do meio de descarga conhecidos, com propriedades definidas e constantes durante os experimentos;
- as propriedades do líquido a ser atomizado podem ser medidas em análises laboratoriais;
- o spray é contínuo e suas características não mudam com o tempo.
- os estudos serão feitos na zona do spray totalmente desenvolvido;

Para a análise das grandezas primeiramente é necessário relacionar as variáveis envolvidas no processo de atomização no injetor. Nesta fase, baseando-se na literatura disponível sobre atomização, pode-se escrever então, para a velocidade  $U$  a equação 4.3:

$$U_g = f(U_0; \rho_a; \rho_L; \theta; d_0; p; \mu; \sigma; z; d_g) \quad (4.3)$$

Variáveis envolvidas:

- Do injetor:

$U_0$  Velocidade do líquido (filme) na descarga

$d_0$  Diâmetro do orifício de descarga

$\theta$  Semi-ângulo de cone do spray

- Do líquido a ser atomizado e ambiente de injeção:

$\rho_L, \rho_a$  Massa específica do líquido e do ar

$\mu$  Viscosidade dinâmica

$\sigma$  Tensão superficial

- Das gotas representativas do spray

$d_g$  Diâmetro representativo de gotas

$U_g$  Velocidade representativa de gotas

$z$  Distância vertical a jusante do orifício de descarga do injetor

$\theta_g$  Ângulo de posição da gota no spray

Então a velocidade representativa  $U_g$  da gota no spray depende dos seguintes parâmetros:  $U_0, \rho_a, \rho_L, \theta, d_0, p, \mu, \sigma, z, d_g$

Ou seja, tem-se  $m=11$  parâmetros, incluindo a própria velocidade da gota  $U_g$ .

Dimensões envolvidas: M (massa), L (comprimento), t (tempo), ou seja,  $n = 3$  dimensões primárias.

$(m - n) = 11 - 3 = 8$  grupos adimensionais ou 8  $\pi$ 's do Teorema de Buckingham.

Verificando os parâmetros que se repetem, com combinações das 3 dimensões básicas (M, L e t), na forma mais simples tem-se:  $U_0; \rho_f; d_0$ . Na tabela 2 apresentam-se as grandezas e as respectivas dimensões.

$U_g$	$U_0$	$\rho_a$	$\rho_L$	$\theta$	$d_0$	$p$	$\mu$	$\sigma$	$z$	$d_g$
$\frac{L}{t}$	$\frac{L}{t}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{L}{L}$	$L$	$\frac{M}{L \cdot t^2}$	$\frac{M}{L \cdot t}$	$\frac{M}{t^2}$	$L$	$L$

TABELA 2 - GRANDEZAS ENVOLVIDAS NA ADIMENSIONALIZAÇÃO

A seguir serão apresentados os grupamentos adimensionais  $\Pi_1$  a  $\Pi_8$ .

#### 4.2.1 Primeiro parâmetro adimensional: $\Pi_1$

$$\Pi_1 = U_0^a \cdot \rho_L^b \cdot d_0^c \cdot U_g$$

$$, \left( \frac{L}{t} \right)^a \cdot \left( \frac{M}{L^3} \right)^b \cdot (L)^c \cdot \left( \frac{L}{t} \right) = L^0 \cdot M^0 \cdot t^0$$

$$L^a \cdot t^{-a} \cdot M^b \cdot L^{-3b} \cdot L^c \cdot L \cdot t^{-1} = L^0 \cdot M^0 \cdot t^0$$

$$L : a - 3 \cdot b + c + 1 = 0$$

$$M : b = 0$$

$$t : -a - 1 = 0$$

Resolvendo-se o sistema de equações algébricas em a, b e c tem-se a equação 4.4 abaixo:

$$\boxed{\Pi_1 = \frac{U_g}{U_0}} \quad (4.4)$$

#### 4.2.2 Segundo parâmetro adimensional: $\Pi_2$

$$\Pi_2 = U_0^d \cdot \rho_L^e \cdot d_0^f \cdot \rho_a$$

$$\left(\frac{L}{t}\right)^d \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right)^e \cdot (L)^f \cdot \left(\frac{M}{L^3}\right) = L^0 \cdot M^0 \cdot t^0$$

Da mesma forma, resolvendo-se o sistema para d, e, f tem-se a equação 4.5:

$$\boxed{\Pi_2 = \frac{\rho_a}{\rho_L}} \quad (4.5)$$

#### 4.2.3 Parâmetro $\Pi_3$

$$\Pi_3 = U_0^g \cdot \rho_L^h \cdot d_0^i \cdot d_g$$

Da mesma forma, resolvendo o sistema para g, h e i tem-se a equação 4.6:

$$\boxed{\Pi_3 = \frac{d_g}{d_0}} \quad (4.6)$$

#### 4.2.4 Parâmetro $\Pi_4$

$$\Pi_4 = U^j \cdot \rho_L^k \cdot d_0^l \cdot z$$

Repetindo e resolvendo o sistema para j, k e l tem-se a equação 4.7:

$$\boxed{\Pi_4 = \frac{z}{d_0}} \quad (4.7)$$

#### 4.2.5 Parâmetro $\Pi_5$

$$\Pi_5 = U_0^m \cdot \rho_L^n \cdot d_0^o \cdot p$$

Novamente, resolvendo o sistema para m, n e o tem-se a equação 4.8.

$$\boxed{\Pi_5 = \frac{p}{U_0^2 \cdot \rho_L}} \quad (4.8)$$

#### 4.2.6 Parâmetro $\Pi_6$

$$\Pi_6 = U_0^p \cdot \rho_L^q \cdot d_0^r \cdot \mu, \text{ resolvendo para p,q e r tem-se a equação 4.9 :}$$

$$\Pi_6 = \frac{\mu}{U_0 \cdot \rho_L \cdot d_0} \quad \text{ou} \quad \boxed{\Pi_6 = \frac{U_0 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\mu}} \quad (4.9)$$

#### 4.2.7 Parâmetro $\Pi_7$

$$\Pi_7 = U_0^s \cdot \rho_L^t \cdot d_0^u \cdot \sigma$$

da mesma forma, resolvendo para s, t e u tem-se a equação 4.10:

$$\Pi_7 = \frac{\sigma}{U_0^2 \cdot \rho_L \cdot d_0} \quad \boxed{\Pi_7 = \frac{U_0^2 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\sigma}} \quad (4.10)$$

#### 4.2.8 Parâmetro $\Pi_8$

$$\Pi_8 = U^v \cdot \rho_L^x \cdot d_0^z \cdot \theta \quad \Pi_8 = \theta$$

ou ainda, com a relação dos ângulos de posição da gota  $\theta_g$  e o ângulo do spray  $\theta$  tem-se a equação 4.11:

$$\boxed{\Pi_8 = \frac{\theta_g}{\theta}} \quad (4.11)$$

#### 4.2.9 Resumo dos parâmetros $\Pi$

Observando as equações de (4.4) a (4.11), tem-se:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{U_g}{U_0} & \Pi_5 &= \frac{p}{U_0^2 \cdot \rho_L} \\ \Pi_2 &= \frac{\rho_a}{\rho_L} & \Pi_6 &= \frac{U_0 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\mu} \\ \Pi_3 &= \frac{d_g}{d_0} & \Pi_7 &= \frac{U_0^2 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\sigma} \\ \Pi_4 &= \frac{z_g}{d_0} & \Pi_8 &= \frac{\theta_g}{\theta} \end{aligned}$$

### 4.3 ANÁLISE DA CORRELAÇÃO ADIMENSIONAL

Reagrupando os parâmetros adimensionais apresentados na equação 4.1 de forma a destacar o adimensional que possui a variável dependente de interesse tem-se a equação 4.12:

$$\Pi_1 = \Pi_2 \cdot \Pi_3 \cdot \dots \cdot \Pi_{m-n} \quad (4.12)$$

Os grupos adimensionais que contém as duas variáveis de interesse são o  $\pi_1$  e  $\pi_3$ , respectivamente para a velocidade e o diâmetro da gotícula. Estes serão dependentes das condições à montante do spray, agrupados nos outros adimensionais.

Estabelecendo uma relação de posição entre uma gotícula a uma distância  $z$  e ângulo  $\theta_g$  com o ângulo principal do spray  $\theta$ , tem-se a função de correlação “f” apresentada pela equação 4.13:

$$\frac{U_g}{U_0} = f\left(\frac{\rho_a}{\rho_L}; \frac{z}{d_0}; \frac{p}{U_0^2 \cdot \rho_L}; \frac{U_0 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\mu}; \frac{\rho_L \cdot U_0^2 \cdot d_0}{\sigma}; \frac{\theta_g}{\theta}\right) \quad (4.13)$$

Da mesma forma a função característica para diâmetro de gotícula é apresentada pela equação 4.14:

$$\frac{d_g}{d_0} = f\left(\frac{\rho_a}{\rho_L}; \frac{z}{d_0}; \frac{p}{U_0^2 \cdot \rho_L}; \frac{U_0 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\mu}; \frac{\rho_L \cdot U_0^2 \cdot d_0}{\sigma}; \frac{\theta_g}{\theta}\right) \quad (4.14)$$

Mas

$$\frac{p}{U^2 \cdot \rho_L} = \text{Eu} \quad (\text{Número de Euler});$$



$$\frac{U \cdot \rho_L \cdot d_0}{\mu} = \text{Re} \text{ (Número de Reynolds);}$$

$$\frac{\rho_L \cdot U^2 \cdot d_0}{\sigma} = \text{We} \text{ (Número de Weber), resultando na equação 4.13a:}$$

$$\frac{U_g}{U_0} = f\left(\frac{\rho_a}{\rho_L}; \frac{\theta_g}{\theta}; Eu; \text{Re}; We; \frac{z}{d_0}\right) \quad (4.13a)$$

A função  $f$  é a função de correlação e, portanto, o objetivo principal. Contudo ela é desconhecida à priori. Ela relaciona todos os grupos adimensionais que doravante tornam-se as variáveis dependentes e independentes, todas ligadas às condições do fluxo. O desafio é, portanto, se buscar a função  $f$  através de um modelo de regressão com significância estatística aceitável. Considerando que as variáveis dependentes são grupos adimensionais também e baseando-se no conceito de homogeneidade dimensional, pode-se propor um modelo de regressão baseado em um produtório de fatores do tipo apresentado pela equação 4.12 a.

$$\Pi_1 = (\Pi_2)^{b_2} \cdot (\Pi_3)^{b_3} \cdot (\Pi_4)^{b_4} \dots (\Pi_n)^{b_n} \quad (4.12 a)$$

Com efeito, Lefebvre (1989) ensina que, no estudo de atomizadores, assim como na mecânica de fluidos em geral, os modelos de predição experimentais mais eficazes são os derivados de grupos adimensionais que relacionem as variáveis independentes ou explicativas do fenômeno. Dessa forma os expoentes  $b_1$  a  $b_n$  tornam-se coeficientes a determinar, que serão extraídos estatisticamente do banco de dados de experimentos.

Escrevendo os parâmetros  $\pi$  na forma dos números adimensionais usuais da Mecânica de Fluidos, segundo um modelo conforme a equação 4.12a, tem-se as equações 4.15 e 4.16:

$$\frac{U_g}{U_0} = k_U \cdot \left( \frac{\rho_a}{\rho_L} \right)^A \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^B \cdot Eu^C \cdot Re^D \cdot We^E \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^F \quad (4.15)$$

$$\frac{d_g}{d_0} = k_d \cdot \left( \frac{\rho_a}{\rho_L} \right)^G \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^H \cdot Eu^I \cdot Re^J \cdot We^K \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^L \quad (4.16)$$

Identificando os adimensionais tem-se:

- número de Euler (razão entre as forças de pressão e as forças de inércia) :

$$Eu = \frac{p}{U_0^2 \cdot \rho_L}$$

- número de Reynolds (razão entre as forças de inércia e as forças viscosas):

$$Re = \frac{U_0 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\mu}$$

- número de Weber (razão entre as forças de inércia e as forças de tensão superficial):

$$We = \frac{\rho_L \cdot U_0^2 \cdot d_0}{\sigma}$$

Além dos grupos adimensionais notáveis, descritos acima, uma relação entre o número de Reynolds e o de Weber também tem utilização no estudo de sprays. Trata-se do número de Ohnesorge, que estabelece a razão entre as forças de viscosas e as de inércia, independentemente da velocidade, ou seja:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \cdot \sigma \cdot d_0}}$$

Este adimensional, contudo, não será usado no levantamento das correlações finais, mas somente os grupos obtidos pela análise dimensional.

A correlação adimensional (4.15) tem uma variável dependente, no caso o razão de velocidades  $U_g/U_0$ . Na correlação mostrada em (4.16) a variável dependente é a razão entre diâmetros  $d_g/d_0$ . Ambas possuem seis variáveis independentes, todas adimensionais, também denominadas de explicativas. O modelo demanda então a obtenção de 6 expoentes do modelo de regressão para cada uma das equações. Além disso, o modelo prevê as constantes de proporcionalidade  $k_u$  e  $k_d$ . Pode-se observar que embora o modelo apresente-se não-linear a expressão pode ser intrinsecamente linearizada, através da correlação com os logaritmos dos parâmetros. Apesar dessa possibilidade aparentemente facilitar o tratamento, o uso do computador não se mostrou menor no que se refere ao tempo de processamento e análise de desvios. Em outras palavras, optou-se pela busca dos coeficientes por regressão não-linear simples. Autores como Lefebvre (1989), ao publicar o primeiro resumo sobre modelos empíricos para diâmetro de gotícula de sprays, apresenta correlações não-lineares para atomizadores mecânicos simples. Além disso, Barros (2003) ressalta que a abordagem com modelos preditivos não-lineares é mais adequada para fenômenos desconhecidos. Corrobora essa idéia também o tutorial do programa comercial de análise estatística Statistica®, recomendando que a primeira abordagem deve ser não-linear.

#### 4.4 EQUACIONAMENTO DE UM SPRAY CÔNICO

Conforme descrito nos capítulos anteriores o atomizador tomado para estudo, do tipo mecânico centrífugo, gera um spray cônico devido ao efeito da componente radial de velocidade do fluido na descarga. Esse efeito ocorre devido ao fluxo de líquido através de passagens tangenciais ou ranhuras helicoidais posicionadas imediatamente à montante do orifício de descarga. O efeito de “raiamento” é conseguido pela usinagem de ranhuras internas ou mesmo a

inserção de peças com hélices. Esse tipo de atomizador possui uma geometria peculiar que demanda um equacionamento de mecânica de fluidos específica. Embora a geometria desse atomizador seja aparentemente simples os processos hidrodinâmicos envolvidos são bastante complexos (LEFEBVRE, 1989, p. 165).

Neste trabalho detalhes da geometria interna da câmara centrífuga, à montante do bico injetor, somente serão considerados para efeito de cálculo da espessura da lâmina na descarga. Assume-se, portanto, que a geometria é definida e se encerra no injetor considerado. O foco do trabalho é, portanto, as correlações entre as características do spray (velocidade e diâmetro) com as propriedades do líquido a montante.

Para o cálculo dos parâmetros  $\pi$  mencionados nos itens anteriores, uma das principais variáveis é a velocidade do líquido “U”. O efeito centrífugo gera um núcleo de ar em que não há fluxo de líquido. Após a descarga a componente radial gera o spray cônico. A figura 16 ilustra um bico mecânico centrífugo em corte longitudinal em que se pode verificar a zona de descarga e a espessura  $t_0$  do filme.

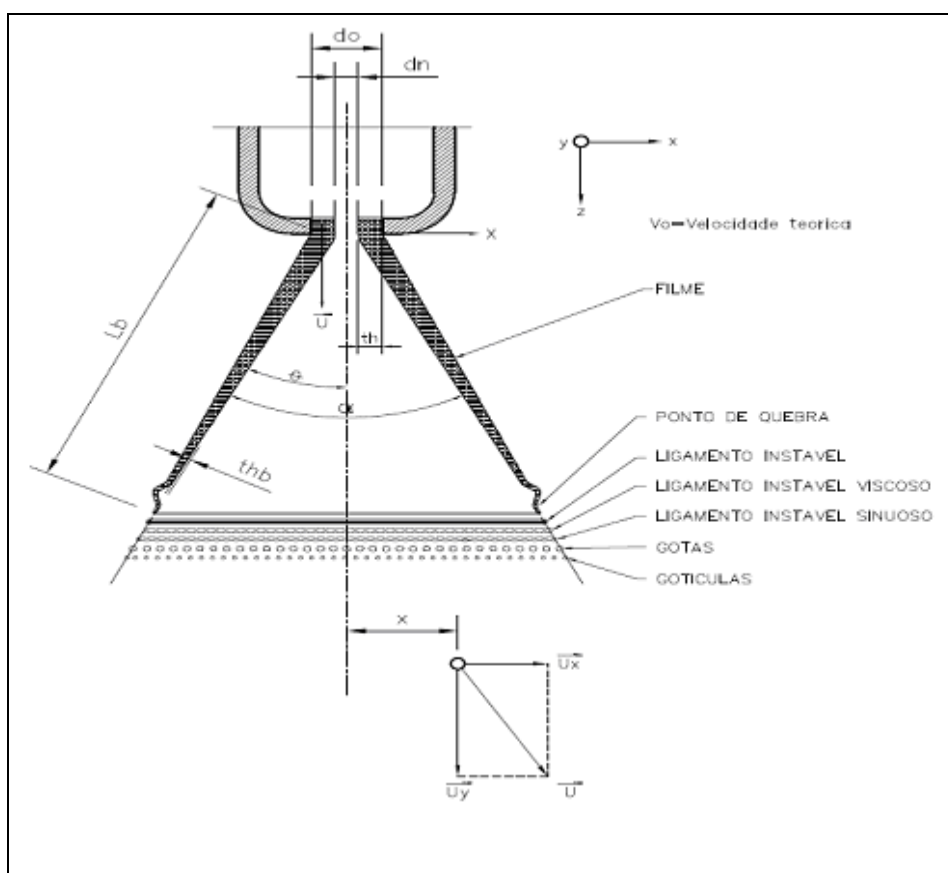


FIGURA 16 – DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS DO SPRAY CÔNICO

#### 4.4.1 Relações geométricas

Da figura 16 podem-se tirar as seguintes relações:

- espessura do filme  $t_0$  na descarga do orifício de diâmetro  $d_0$  e com núcleo de ar com diâmetro  $d_n$ , identificada na equação 4.17

$$t_0 = \frac{d_0 - d_n}{2} \quad (4.17)$$

- relação de áreas  $X$ , na equação 4.18

$$X = \frac{A_n}{A_0} = \left( \frac{d_n}{d_0} \right)^2 \quad (4.18)$$

- em termos da espessura do filme na descarga  $t_0$ , equação 4.19:

$$X = \frac{(d_0 - 2.t_0)^2}{d_0^2} \quad (4.19)$$

#### 4.4.2 Número de Fluxo $F_n$

Conforme já definido no capítulo 3, na equação (3.3), o número de fluxo é dado por:

$$F_N = \frac{\dot{m}_L}{\sqrt{\Delta P \cdot \rho_L}}$$

#### 4.4.3 Coeficiente de descarga Cd

O coeficiente de descarga nos atomizadores mecânicos centrífugos é inevitavelmente baixo, devido ao núcleo de ar, com área  $A_n$  formada no orifício devido ao efeito centrífugo. Lefebvre (1989) comenta que um dos grandes desafios no estudo de atomizadores mecânicos centrífugos é o cálculo preciso do coeficiente de descarga. No presente estudo a vazão real é medida nos ensaios através do levantamento das curvas pressão x vazão para cada líquido a ser utilizado no experimento.

$$Cd = \frac{\text{vazão mássica real}}{\text{vazão mássica teórica}} \Rightarrow Cd = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{teórica}} \quad (4.20)$$

#### 4.4.4 Vazão mássica teórica ( $\dot{m}_{teórica}$ )

Assumindo que não ocorram perdas importantes dentro do atomizador, até o orifício de descarga, a pressão a montante do orifício pode ser considerada constante e igual à pressão do líquido na entrada do injetor. Essa consideração é feita por Lefebvre (1989) ao definir o cálculo da velocidade teórica na descarga do orifício pela aplicação da equação de Bernoulli, resultando na equação 4.21:

$$\frac{U_0^2}{2g} = \frac{P_{int} - P_0}{\rho_L g} \quad U_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_L}} \quad (4.21)$$

E a vazão mássica teórica pode ser calculada pela equação 4.22:

$$\text{Se } \dot{Q} = A_0 \cdot U_0 \text{ e então } \dot{m}_{teórica} = \rho_L \cdot U_0 \cdot A_0 \quad (4.22)$$

Finalmente, com as equações (4.21) e (4.22) tem-se a equação 4.23:

$$\dot{m}_{teórica} = \rho_L \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_L}} \Rightarrow \dot{m}_{teórica} = A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_L \cdot \Delta P} \quad (4.23)$$

#### 4.4.5 Cálculo do coeficiente de descarga real

Em um experimento a vazão de descarga  $\dot{m}_L$  (real) do bico pode ser medida e fará parte do procedimento padrão de ensaios. Assim o coeficiente de descarga pode ser calculado pela equação 4.24:

$$Cd = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_L}}} \quad (4.24)$$

#### 4.4.6 Cálculos da velocidade real do líquido na descarga U

A velocidade  $U_0$  na descarga (considerando fluxo anular e núcleo oco) pode ser realizada com a equação 4.25:

$$U_0 = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L \cdot (A_0 - A_n)} \quad (4.25)$$

Lembrando que  $\dot{m}_L$  é a vazão real de líquido.

Observa-se que ainda persiste a necessidade de se ter a área do núcleo  $A_n$  para que se possa calcular a velocidade “U” real de descarga do filme no orifício. Da equação (4.17) tem-se:

$$d_n = d_0 - 2t_0 \quad (4.26)$$

e

$$A_n = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \quad (4.27)$$

Neste ponto, assim como mencionou Lefebvre (1996) e Chryssaquis (2003), o cálculo da espessura do filme de líquido  $t_0$  na descarga é mandatório para que se possa calcular a velocidade real, indispensável para os grupos adimensionais  $\pi$ . A medição da espessura real é extremamente difícil e o cálculo analítico tornou-se um desafio. A literatura especializada indica quatro modelos para o cálculo de  $t_0$ , segundo Lefebvre (1996), em seu estudo comparativo. As equações serão apresentadas nos itens a seguir.

#### 4.4.7 Modelos para cálculo de $t_0$

Lefebvre (1996) e Chryssaquis (2003) fizeram uma coletânea de modelos de propostas de cálculos de  $t_0$  segundo vários autores, a saber:

##### 4.4.7.1 Proposta de Giffen e Muraszew

$$\left( \frac{A_p}{D_s d_0} \right)^2 = \frac{\pi^2}{32} \left( \frac{(1 - X)^3}{X^2} \right) \quad (4.28)$$

Sendo  $A_p$  a área total de portas de entrada do líquido das ranhuras geradoras do efeito de giro (“swirl”) e  $D_s$  o diâmetro equivalente dessas portas, à montante do orifício de descarga e  $X$  é a relação de áreas, apresentada pela equação 4.18, reproduzida abaixo.

$$X = \frac{A_n}{A_0} = \left( \frac{d_n}{d_0} \right)^2$$



#### 4.4.7.2 Proposta de Simmons e Harding

$$t_0 = 0,00805 \cdot \frac{\sqrt{\rho_L} \cdot F_N}{d_0 \cdot \cos \theta} \quad (4.29)$$

#### 4.4.7.3 Proposta de Rizk e Lefebvre

$$t_0 = 2,7 \cdot \left[ \frac{d_0 \cdot F_N \cdot \mu_L}{\sqrt{\Delta P_L} \cdot \rho_L} \right]^{0,25} \quad (4.30)$$

#### 4.4.7.4 Proposta de Griffen e Risk

Nesta equação aparecem características geométricas da câmara de giro à montante do orifício de descarga, o diâmetro da câmara  $D_s$  e a área total das portas de entrada da câmara  $A_p$ ;

$$0,09 \cdot \left( \frac{A_p}{D_s d_0} \right) \left( \frac{D_s}{d_0} \right)^{0,5} = \frac{(1-X)^3}{X^2} \quad (4.31)$$

As quatro equações 4.28 a 4.31 fornecem diferentes valores para a espessura do filme na descarga  $t_0$ . Lefebvre (1996) fez um estudo comparativo sobre um banco de dados experimental utilizando água tendo elegido os modelos de Simmons e Harding, equação 4.29 e o de Griffen e Rizk, equação 4.31 como os que mais se aproximaram dos resultados experimentais. O autor faz, entretanto, uma ressalva sobre os modelos e confirma a necessidade de verificação experimental para a seleção do mais adequado ao atomizador.

Considerando as ressalvas este trabalho propõe também a verificação estatística do melhor modelo de cálculo de espessura do filme. O objetivo é

selecionar a equação de cálculo de melhor desempenho comparando-se os valores experimentais e os preditos do modelo, dentro da avaliação estatística.

#### 4.4.8 Cálculos dos parâmetros adimensionais

Com as equações apresentadas no item anterior é possível o cálculo dos parâmetros adimensionais relacionados na equação 4.15. Sobretudo a velocidade real do filme de líquido “U”, na descarga do injetor, permite o cálculo dos parâmetros  $\pi$  dependentes de características dinâmicas como o número de Weber e o de Reynolds.

A busca pelos modelos de correlação demandou a formação de um banco de dados de experimentos e cálculo dos parâmetros adimensionais. Apresenta-se a seguir o plano de experimentos e os recursos laboratoriais utilizados.

### 4.5 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A abordagem proposta nesta tese demandou a formação de um banco de dados contendo os resultados de medições das principais características do spray, especialmente o campo de diâmetros e o de velocidades. Um banco de dados amplo seria necessário pois o fenômeno da atomização é fortemente dissipativo, com não-linearidades importantes, conforme já comentado. Além disso, a oferta de correlações para o campo de velocidades, um dos principais objetivos dessa tese, indicava o uso de planejamento fatorial pelo seu ineditismo na literatura técnico-científica. O planejamento de ensaios será apresentado a seguir.

#### 4.5.1 Abordagem estatística

O plano para a formação do banco de dados do trabalho foi dividido em duas fases distintas, com objetivos específicos, a saber:

Fase 1 – Testes exploratórios.

Fase 2 – Ensaios pelo planejamento fatorial.

Os testes exploratórios foram indispensáveis para um melhor desempenho da campanha de ensaios da fase subsequente. Essa recomendação fora feita por Souza (2002) em seu trabalho com atomizadores duplo-fluido. Dentre outras razões, questões como a segurança no uso de líquidos combustíveis, dúvidas quanto ao comportamento dos ensaios e incertezas no desempenho da bancada de sprays justificaram plenamente a fase 1. Além disso, nesta etapa foi possível conhecer melhor o fenômeno, as características da bancada e suas limitações.

Na fase 2 os ensaios foram realizados em sua plenitude. Para tal adotou-se o planejamento de ensaios como uma forma organizada de observar as variáveis dependentes e independentes. O delineamento adotado foi o fatorial simples tendo os grupos adimensionais como fatores, presentes no lado direito das equações (4.15) e (4.16). No total foram 6 fatores, cada um com seu respectivo conjunto de níveis. Os níveis foram obtidos indiretamente, pela variação das propriedades físicas dos líquidos, as condições operacionais e características geométricas, a saber:

- diâmetro do orifício de descarga: 6 níveis;
- pressão do líquido à montante: 5 níveis;
- posição no spray cônico: 12 posições;
- líquido de teste: 9 níveis, sendo que cada líquido encerra 3 propriedades: a tensão superficial, massa específica e viscosidade;

Embora elevado, esses níveis são necessários para que os fatores disponham de variabilidade necessária ao estudo do fenômeno. Vale lembrar que os experimentos vinculados a combinações de níveis inexequíveis simultaneamente não poderiam ser realizados, já que um determinado líquido encerra as três propriedades mencionadas. Sendo assim, o planejamento fatorial completo não poderia ser totalmente coberto e a análise de resultados levou isso

em consideração. Mesmo assim o número de ensaios foi substancial, cobrindo as faixas de interesse da pesquisa, sobretudo a lista de combustíveis mais comumente usados nos sistemas de injeção.

Ao final os resultados seriam submetidos a uma avaliação estatística, inclusive com análise de variância e levantamento das variáveis realmente influentes no fenômeno.

#### 4.5.2 Testes exploratórios – Fase 1

Conforme descrito no item 4.1.2, uma das principais fases da abordagem experimental são os testes exploratórios. Os resultados permitiram uma análise do comportamento do spray, sua morfologia e características. Nas duas bancadas de ensaio, respectivamente na bancada de espalhamento de lasers (Malvern) e de LDI (Artium) foram realizadas baterias de ensaios de caráter exploratório com o objetivo de se estudar:

- as regiões do spray;
- a simetria do spray cônico;
- a variância de resultados e repetibilidade;
- os fatores mais influentes nas variáveis dependentes (diâmetro e velocidades) com as independentes como as propriedades dos líquidos, condições operacionais e geometria;
- as peculiaridades do injetor escolhido para os ensaios;
- observação preliminar dos efeitos de pressão de injeção;

Nesta fase foi utilizada somente água desmineralizada como fluido de teste. As principais razões dessa escolha foram:

- a segurança de um líquido não inflamável, atóxico e não agressivo;
- a facilidade de obtenção e manuseio;
- as propriedades físicas como tensão superficial e viscosidade são comensuráveis com facilidade no laboratório. Com isso pode-se verificar a calibração dos equipamentos de medição como tensiômetro e viscosímetro.

Outra questão importante nessa fase foi a definição do procedimento de

ensaio padrão, inclusive reduzindo o número de medições em zonas simétricas do spray. Apesar do spray com formato cônico ser intrinsecamente simétrico, foi necessária uma evidência estatística em relação ao comportamento das velocidades e diâmetros. Para tal foram feitos ensaios em posições  $P(x,y,z)$  do spray simétricas e os resultados verificados segundo o teste “t” de Student, notório teste de hipóteses comentado, dentre outros autores, por Barbetta (2004).

#### 4.5.3 Formação do banco de dados e análise

Com os resultados dos ensaios exploratórios seguiu-se para a fase 2, que envolveu o maior número de ensaios, pelo delineamento fatorial. Seguiram-se a depuração, repetição de alguns ensaios e incremento do banco de dados. Para cada ensaio foram efetuados os cálculos dos parâmetros adimensionais “ $\pi$ ” envolvidos, conforme item 4.2. Nesta fase foram adicionados também resultados das medições do ângulo de cone  $\alpha$ , observados e medidos sobre as fotos de alta velocidade. Para determinação precisa das propriedades dos líquidos de teste foram necessárias análises de laboratório.

Finalmente, para a análise do banco de dados, optou-se pelo uso de programas computacionais de análise estatística, tal como o programa Statistica®. O uso dessa ferramenta foi conveniente, pois permitiu vários tipos de análises com diferentes métodos de cálculo. Para a obtenção dos modelos de correlação principais foi usada a regressão não-linear múltipla. Adicionalmente, com o objetivo de se verificar o nível de significância das regressões obtidas, foram feitas várias análises estatísticas, inclusive uma análise de variância “ANOVA”. Esta abordagem é recomendada por vários autores como Walpole (1993), Barros (2003) e Barbetta (2004).

#### 4.5.4 Lista de líquidos de teste

Para que se pudesse variar as propriedades dos líquidos e com isso se observar o comportamento das variáveis de interesse, optou-se pelo ensaio de vários líquidos com diferentes propriedades físicas. No caso as grandezas a serem variadas foram a viscosidade, a tensão superficial e a densidade. Assumindo que os sistemas de injeção eletrônica de combustível operam, via de regra, com gasolina e álcool (ou mistura destes) os valores das propriedades desses líquidos foram tomados como referência. Para a seleção da lista de líquidos foram considerados dois critérios básicos, a saber:

- as propriedades dos líquidos escolhidos deveriam possuir então valores maiores e menores do que os referenciais (gasolina);
- as três propriedades de cada líquido deveriam ser discrepantes de forma a proporcionar uma variância para posterior análise contra as variáveis de interesse.

A Tabela 3 abaixo mostra as propriedades teóricas dos líquidos selecionados para os ensaios, obtidas de referências bibliográficas conforme indicado.

Líquidos	Valores Teóricos				
	Massa específica	Viscosidade		Tensão Superficial	
	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (10 °C) (cSt)	$\nu$ (20 °C) (cSt)	$\sigma$ (10 °C) (mN/m)	$\sigma$ (20 °C) (mN/m)
ISO - OCTANO	693,7	0,82	0,73	19,69	18,77
Alcoilado	NA	NA	NA	NA	NA
ETANOL	789,8	1,81	1,50	23,71	22,43
ETANOL ANIDRO	789,8	1,81	1,50	23,71	22,43
ÁGUA DESMI.	997,84	1,31	1,00	74,22	72,74
ÁGUA (40%) + GLICERINA (60%)	1147,35	74,28	32,31	62,46	61,48
ÁGUA (50%) + GLICERINA (50%)	1112,8	37,65	17,29	74,22	72,74
Gasolina 1	NA	NA	NA	NA	NA
Gasolina 2	NA	NA	NA	NA	NA

Notas:

NA - Não Aplicável por tratar-se de mistura complexa

TABELA 3 - PROPRIEDADES TEÓRICAS DOS LÍQUIDOS

FONTE: PERRY (1992) e simulador computacional de processo PETROX®

Os valores teóricos dos líquidos, apresentados na tabela 3 foram posteriormente cotejados com as medições de laboratório, ou seja, valores reais obtidos de análises laboratoriais.

#### 4.5.5 Injetores escolhidos

Para os ensaios foi escolhido um bico injetor convencional da marca BOSCH. A figura 17 mostra o desenho de injetor utilizado nesse trabalho com suas principais partes. O ANEXO 2 traz mais detalhes. A velocidade angular do fluido, que permite a geração de um spray cônico oco, é obtida devido à presença de ranhuras helicoidais usinadas na câmara de giro, imediatamente à montante do orifício de descarga.

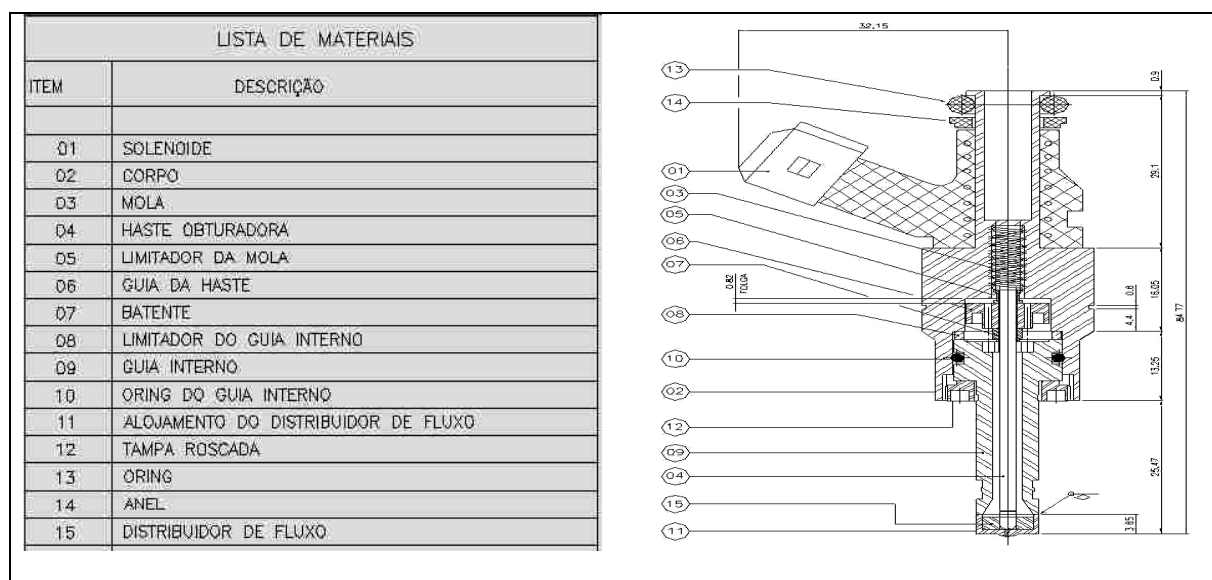


FIGURA 17 - BICO INJETOR

#### 4.6 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE SPRAYS UTILIZADAS

Existem várias técnicas para a pesquisa e avaliação de sprays de engenharia. Segundo menciona Yule (1996) pode-se classificar as técnicas primeiramente em qualitativas, voltadas à comparação de sprays similares e as quantitativas, que efetivamente fornecem valores das características como o diâmetro e velocidades, indispensáveis ao estudo ora proposto. Além destas são igualmente úteis as técnicas qualitativas para a observação do spray como as fotografias.

Souza (2007) faz um apanhado geral das técnicas de medição utilizadas para o estudo de sprays, apresentando outros critérios de classificação. A questão da intrusividade deve ser considerada, pois a penetração de sondas ou detectores, necessários a medição, podem causar perturbações importantes no jato que acabam por desclassificar a medição. O autor apresenta um resumo das técnicas não-intrusivas na figura 18, com as utilizadas neste trabalho em destaque.

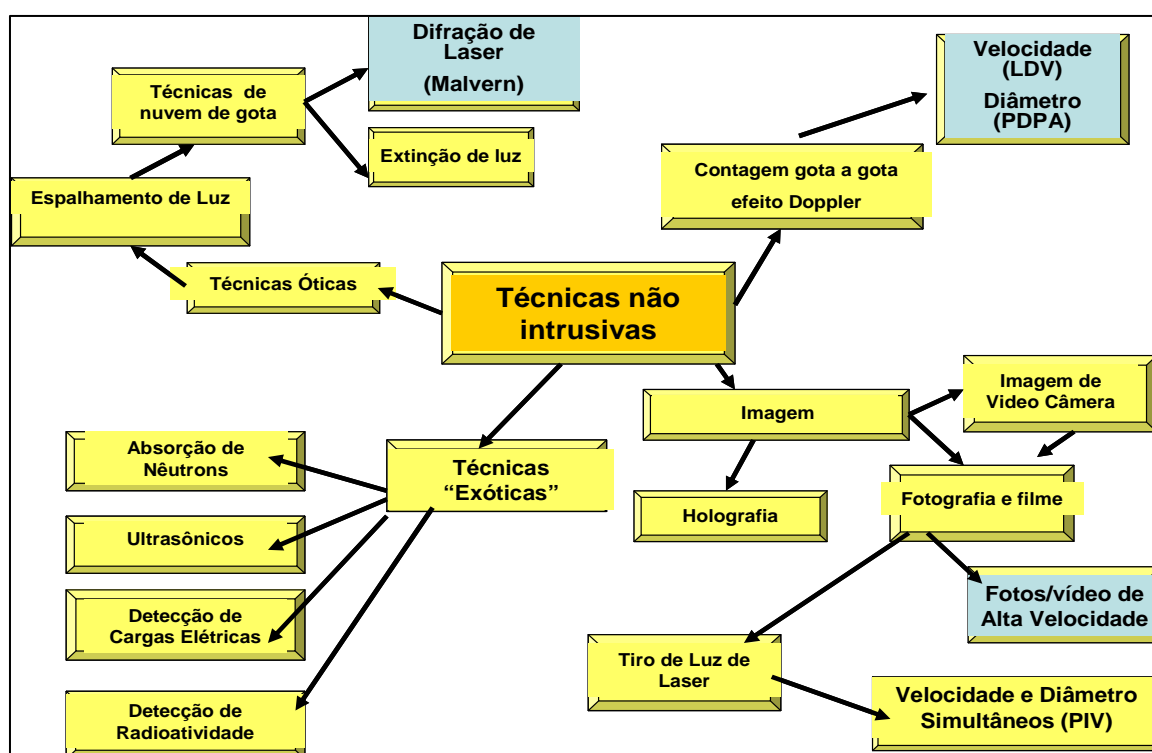


FIGURA 18 – RESUMO DE TÉCNICAS NÃO INTRUSIVAS

As técnicas intrusivas têm sido francamente descontinuadas e a literatura especializada menciona o uso de raios laser como o grande avanço e vantagem devido a sua intrusividade quase nula. Existem obviamente outras técnicas disponíveis, com aplicações específicas. Resumidamente as técnicas utilizadas neste trabalho foram eminentemente não-intrusivas, a saber:

- **qualitativas:** foto convencional e foto de alta velocidade, utilizadas somente para observação e verificação da geometria do spray;
- **quantitativas:** técnicas baseadas na perturbação de raios laser como o espalhamento para medição do diâmetro de gotícula (Malvern) e interferometria por efeito Doppler (PDI, PDPA e LDV) que retornam medições de diâmetro e velocidade das gotículas.



O modelo adimensional obtido no item anterior indicou quais os parâmetros que deveriam ser investigados de forma a concluir uma correlação preditiva com o diâmetro final da gotícula. O diâmetro “D” à esquerda da relação proposta tem valor discreto e, portanto, deveria ser indispensavelmente medido. Primeiramente é necessário conhecer de que maneira um spray de gotículas pode ser estudado através de um valor discreto de diâmetro. Da mesma forma fica o campo de velocidades, lembrando que em um sistema ortogonal têm-se as três direções  $v=v(x, y, z)$ . Os métodos de medição de spray, contudo, consideram uma determinada região do spray que deverá ser tomada para estudo, denominada “volume ou superfície de controle de medição”. A aplicação desse conceito deve ser entendida segundo dois modos:

- dimensional: quando o conceito de diâmetro representativo é aplicado a uma região do spray tomada para estudo, em que haja uma população de gotículas, tomadas instantaneamente, ou seja, sem levar em consideração a variação em função do tempo. As técnicas fotográficas, considerando que o tempo de “abertura” do obturador (câmeras convencionais) ou tempo de “varredura” em câmaras digitais é muito pequeno em função do evento, devem ser consideradas dimensionais;
- temporal: quando se fixa uma determinada região do spray e considera-se a variação de todas as gotículas em movimento naquela região segundo um intervalo de tempo. Neste caso os resultados obtidos serão uma média dos diâmetros representativos instantâneos.

Busca-se então escolher uma ou várias técnicas de avaliação de sprays que forneçam condições, diretas ou indiretas, para a medição e o cálculo do SMD bem como seu campo de velocidades.

O uso de raios laser para estudos de sprays deu um importante passo quando os medidores tornaram-se populares e os custos caíram. É notório o avanço da atomização desde o final da década de 80 com a disponibilidade de medidores por perturbação de raios laser. Vários renomados autores como Lefebvre (1992), Yule (1996) e Chigier (2003) comentam as vantagens trazidas por essas técnicas, sobretudo sua não intrusividade para uma medição quantitativa e determinística das grandezas diâmetro e velocidade. Trabalhos como o de Lee et al. (2001), focando injetores de motores diesel, mostrou as vantagens da técnicas a laser como a velocimetria por efeito Doppler a laser- LDV para a medição pontual

das velocidades das gotículas e PDPA para o diâmetro representativo de Sauter (SMD).

#### 4.6.1 Fotografia convencional

A **fotografia comum ou convencional**, embora seja a técnica de menor custo, muito pouco tem a oferecer ao estudo de sprays. Neste trabalho essa técnica foi utilizada somente para a determinação do ângulo principal do spray por medição direta sobre a imagem. A velocidade do jato impossibilita a formação de uma imagem suficientemente nítida para a visualização da gota. O deslocamento é considerável dentro do intervalo de tempo de varredura da câmara digital (equivalente ao tempo em que o obturador convencional fica aberto), mesmo no ajuste mais veloz de câmeras convencionais (1/1000s).

#### 4.6.2 Fotografia de alta velocidade

A **fotografia de alta velocidade** por sua vez é amplamente empregada no estudo de sprays, pois permite uma avaliação qualitativa de suas características com equipamentos de baixo custo, quando comparados com técnicas quantitativas, comenta Souza (2002). O grande problema, entretanto, é a impossibilidade de obter-se um diâmetro representativo, quantitativo do spray. Através desse método, a obtenção de valores de diâmetro mais confiáveis só é possível através de levantamento estatístico partindo de um universo de medições de gotículas relativamente grande, ou seja, contar individualmente milhares de corpúsculos medindo seu diâmetro em ampliações fotográficas.

Para este trabalho o levantamento fotográfico foi considerado exaustivo e pouco efetivo. A foto de alta velocidade consiste em reduzir o tempo de exposição a um mínimo de tal forma que a gota apareça com formato quase globular, ou seja, com seu aspecto real. Os melhores resultados são obtidos com jatos de baixa

velocidade que obviamente permitem o uso de maiores tempos de exposição.

A técnica utilizada por Souza (1998) consiste no uso de equipamentos fotográficos convencionais como câmeras óticas com filmes mais rápidos, mas obturadores e diafragmas comuns. A principal exceção refere-se apenas ao “flash”, que deve ter tempo de disparo reduzido. O método buscava a obtenção de uma impressão nítida do spray em um filme de sensibilidade ISO 400 com curtíssimos tempos de exposição (até 20 microssegundos). Para tal o spray a ser analisado deve ser mantido na penumbra, montado verticalmente para baixo. Uma câmera ótica convencional, com obturador permanentemente aberto é montada perpendicularmente ao spray. Este recurso é indispensável e é conhecido como a opção “B” do inglês “*bulb*” em que o obturador permanece aberto por tempo superior a 1 minuto ou até o próximo clique. Com o auxílio de um flash de alta velocidade, com intervalo de relâmpago da ordem de  $10^{-5}$  s é possível impressionar um filme convencional ISO 400. A sensibilidade em modernas câmeras digitais pode ser ajustada ao equivalente ISO 400 ou mesmo serem tratadas posteriormente por programas de tratamento de imagens.

A fotografia obtida mostra um conjunto de gotas, da região do foco, com aspecto quase congelado, permitindo uma avaliação conclusiva. No caso de uma gotícula com diâmetro de 300 microns, por exemplo, que se desloca a uma velocidade de 35 m/s (condições típicas do spray abordado nesse trabalho) tem-se, para um tempo de relâmpago de 20  $\mu$ s o deslocamento de 700 microns. A gotícula terá então a forma de um elipsóide com eixo maior de cerca de 2,33 diâmetros (na direção do deslocamento) e diâmetro real na direção perpendicular à trajetória. A figura 19 abaixo apresenta um aparato típico para fotos de alta velocidade com flash ótico proposto por Souza (1998).

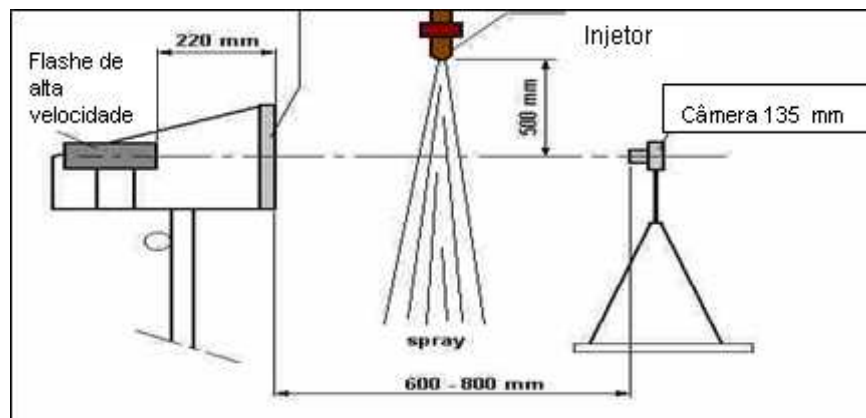


FIGURA 19 - ESQUEMA DE BANCADA PARA FOTOS DE ALTA VELOCIDADE

Um exemplo de foto de alta velocidade obtida neste trabalho pode ser visto na figura 20.

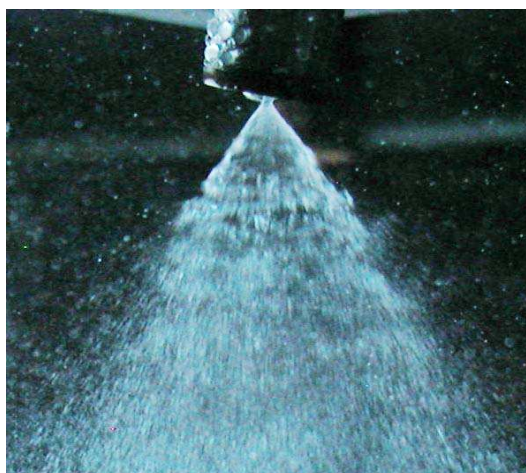


FIGURA 20 - FOTO DE ALTA VELOCIDADE

#### 4.6.3 Espalhamento de raios laser (Malvern)

Conforme já comentado os métodos não-intrusivos mais utilizados são os que usam perturbação ótica das partículas sobre luz coerente, especificamente raios laser. Neste trabalho optou-se pelo uso de técnicas como o espalhamento de raios laser e por efeito Doppler.

O primeiro deles tem como princípio de medição a difração de Fraunhofer em que uma gotícula submetida a um feixe de luz coerente monocromático incidente promove um espalhamento de luz que pode ser detectável. O conceito de

espalhamento baseia-se na somatória de vários efeitos óticos, principalmente a difração. A luz perturbada por este efeito forma anéis ou franjas de luz detectáveis por um receptor de luz espalhada, conforme ensina Rawle (1992). Este espalhamento depende do diâmetro das gotas do jato analisado. O instrumento medidor utilizado neste trabalho tem nome comercial de Matersizer X da Malvern. A figura 21 apresenta o princípio de medição do diâmetro por espalhamento de raios laser. No levantamento do banco de dados esse medidor foi utilizado somente para a fase preliminar de ensaios. Para a formação final do banco foi utilizado o medidor a LASER do tipo PDI- *Phase Doppler Interferometry* do fabricante ARTIUM.

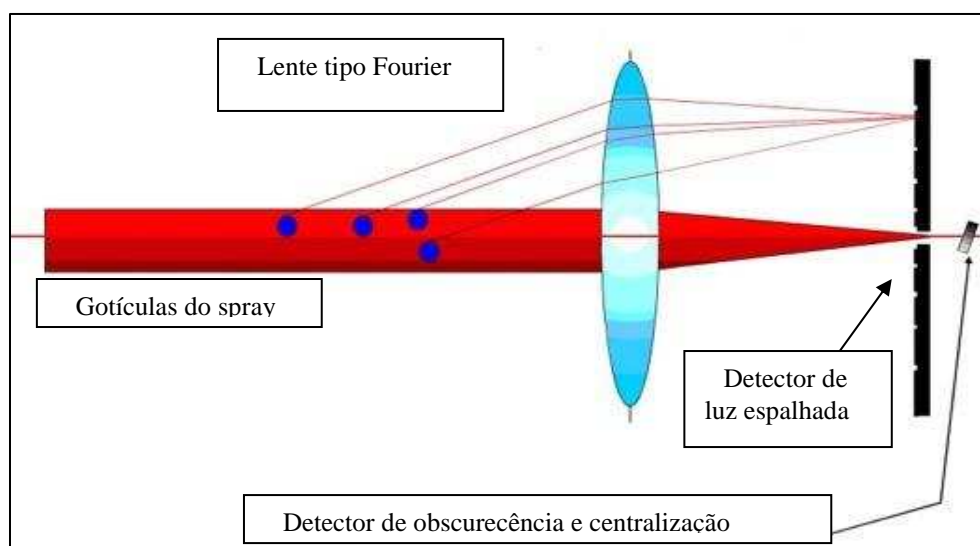


FIGURA 21 - PRINCÍPIO DE ESPALHAMENTO DE RAIOS LASER- MEDIDOR MALVERN  
 FONTE: RAWLE (1992)

#### 4.6.4 Interferometria por efeito Doppler em Laser (PDI, PDPA, LDV)

Bachalo (1980) descreveu teoricamente o fenômeno da dispersão de luz promovido por partículas esféricas. Mostrou que a mudança de direção de tal dispersão poderia ser usada para obtenção de medidas exatas e confiáveis do diâmetro das partículas causadoras da perturbação. O autor observou que com a utilização de pares de detectores era possível a detecção do padrão de interferência de franja formado pelo raio de alcance do espalhamento luminoso.

Com isso um novo método foi concretizado para medidas precisas do tamanho de gotas de spray, mesmo em ambientes de difícil medição. Seguindo o desenvolvimento inicial da metodologia de interferometria por efeito Doppler, muito tem sido feito, através de pesquisa e desenvolvimento, para o aprimoramento deste importante instrumento de medição não-intrusiva. Inúmeras publicações estão disponíveis sobre o assunto.

O interferômetro de efeito Doppler (PDI), formalmente conhecido como analisador de partículas efeito Doppler (PDPA), vem sendo desenvolvido como um dos principais instrumentos de diagnóstico de sprays. Usam raios laser para a medição do tamanho e velocidade de partículas esféricas individuais em ambiente de fluxo polidisperso. O sucesso do método pode ser atribuído aos princípios de medição nos quais está baseado, isto é, interferometria de luz dispersa. A interferometria de dispersão da luz utiliza o comprimento de onda como uma medida de escala e, como tal, o desempenho não é tão facilmente degradado como em sistemas que utilizam informações a cerca do ângulo de espalhamento da luz, conforme descrito no item anterior no equipamento Malvern. Além disso, o método tem a vantagem de não necessitar de freqüentes calibrações. Durante décadas, o instrumento tem demonstrado a necessidade de somente um fator inicial de calibração. Os parâmetros que influenciam a medição, como o comprimento de onda, o ângulo de intersecção do feixe de luz, comprimentos focais do emissor e receptor e o detector de separação não mudam com o tempo. As modificações têm que ser introduzidas pelo usuário a menos de uma falha do equipamento. Outra importante característica do método, que é freqüentemente esquecida, está relacionada com os sinais gerados pelo dispositivo. Sinais sinusoidais exclusivos são produzidos sendo que os mesmos podem ser facilmente detectados, mesmo em presença de perturbações, usando análise de Fourier.

#### 4.6.5 Comparativo das técnicas utilizadas

Souza (2007) apresenta na tabela 4 uma comparação das técnicas de medição baseadas em Laser. As principais características, limitações de medição e

princípios óticos podem ser obtidos nas referências bibliográficas do trabalho. O banco de dados de medição utilizado neste trabalho baseou-se na técnica de LDV/PDPA.

Características/Técnicas a LASER	Phase-Doppler (LDV/PDPA)	Espalhamento (Malvern)
Menor gotícula	1 micron	Sub-micron
Não- esfericidade	Usualmente detectável, mas imprecisa	Pode ser detectada, mas imprecisa
Método de amostragem	Contagem gota a gota	Estatística
Maior partícula	Poucos mm	Poucos mm
Medição de velocidade	sim	não
Volume de controle de amostragem	Até 1 mm	Entorno de 10 mm
Distribuição	Temporal ou espacial	espacial

TABELA 4 - COMPARATIVO DAS TÉCNICAS A LASER

#### 4.7 APARATO EXPERIMENTAL

Considerando que este trabalho explorou a experimentação como forma de investigação científica da atomização, fez-se necessária a construção de uma bancada de ensaios. O objetivo principal era a geração de sprays de forma que todas as variáveis e parâmetros envolvidos no fenômeno pudessem ser medidos e cotejados com o campo de diâmetros e o de velocidades. A bancada visava a coleta de dados da corrente de líquido a ser atomizado e as medições com laser em pontos do spray com coordenadas ortogonais precisamente conhecidas. As propriedades físicas do líquido são bastante dependentes da temperatura, justificando, portanto a medição precisa dessa variável. Além disso, e não menos importante, foi necessária a medição precisa da vazão de líquido em cada condição de operação. Para tal foi utilizada a pesagem do líquido coletado em erlenmeyer em tempo cronometrado. A figura 22 apresenta uma separata do fluxograma da bancada sendo que o ANEXO 1 traz o desenho completo.

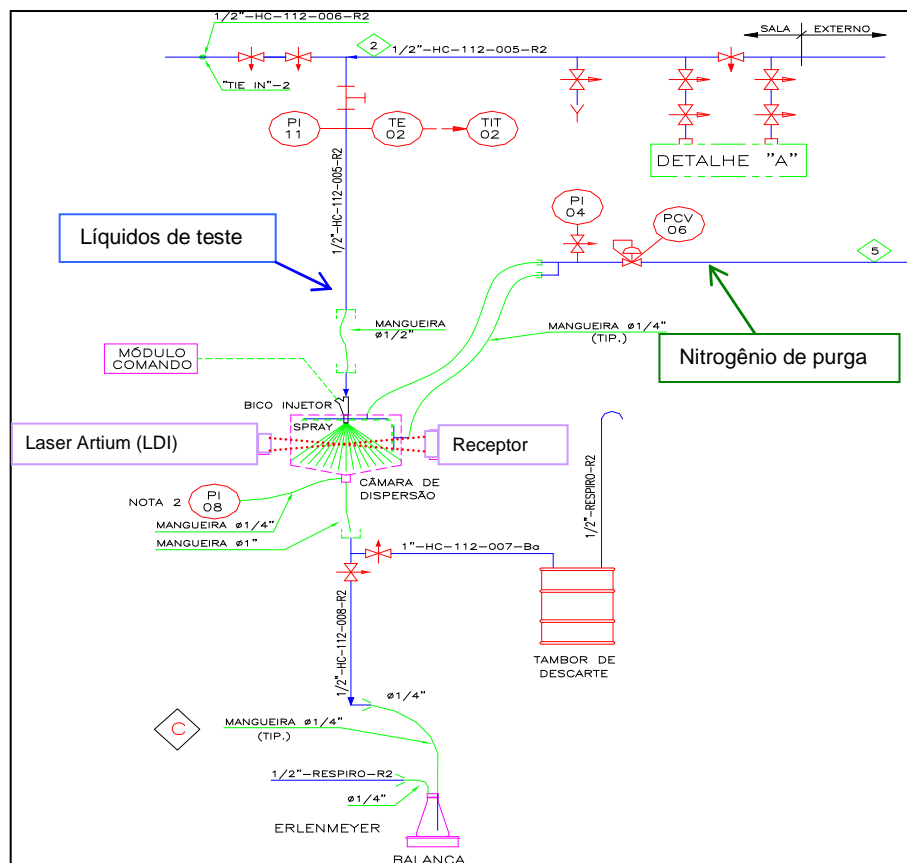


FIGURA 22 - FLUXOGRAMA DA BANCADA DE ENSAIOS

Após os trabalhos de projeto os componentes da bancada foram adquiridos e montados em uma sala de testes apropriada. A lista final de equipamentos utilizados consta no ANEXO 4. Algumas peculiaridades do projeto da sala, em função de seu objetivo, foram:

1. paredes pintadas com tinta fosca na cor cinza claro para evitar-se reflexão de luz, em atendimento a procedimentos operacionais e de segurança no uso do medidor a laser.
2. purga de nitrogênio na campânula de spray para prevenir o molhamento das janelas de vidro e evitar formação de mistura explosiva quando do uso de líquidos combustíveis.
3. pintura nas janelas na sala de forma a controlar o nível de luminosidade.

O fluxograma da bancada de ensaios, apresentado no ANEXO 1, traz a identificação dos instrumentos e os dados básicos de processo.



#### 4.8 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com a bancada de ensaios concluída iniciou-se então os ensaios e a formação do banco de dados. O procedimento experimental compreendia, resumidamente, duas fases distintas: a preparação do aparato e a execução dos ensaios propriamente ditos. Na fase de preparação, estando definido o fluido a ser testado, procedia-se a carga com cerca de 100 litros do líquido no vaso de carga. Este vaso possui um êmbolo em que a pressurização era dada por uma ampola de nitrogênio com 212 Bar de pressão. Com auxílio de válvula de controle de pressão à jusante, o passo seguinte era pressurizar um dos lados do êmbolo e, com isso, este pressurizar o líquido na pressão desejada. Com o preenchimento das linhas e purga de ar, o fluido era carregado pela tubulação até as válvulas a montante do bico injetor. Ainda na fase de preparação procedia-se o alinhamento das barras de laser do sistema PDI da Artium. Para tal usou-se um sistema de mesa de coordenadas com motores de passo, com leitura das coordenadas x, y e z. O ajuste da mesa permitia então alinhar as barras de laser colocando o volume de controle de medição (zona compreendida na interseção das barras de luz laser) exatamente no orifício de descarga do injetor, fixando a coordenada  $P(0; 0; 0)$ . Em seguida alinhava-se o gás nitrogênio de purga, para dentro da campânula, com o objetivo de criar-se uma atmosfera inerte, afastado o risco de detonação no caso de teste com líquido inflamável.

Concluindo-se a fase de preparação iniciaram-se então os ensaios. A princípio, estando definido o bico injetor, com geometria conhecida, ajustava-se então a pressão de teste. Para tal alinhava-se o líquido abrindo as válvulas e liberando o líquido para o spray. Com o fluxo estabelecido regulava-se a válvula tipo agulha à montante do bico de forma a ajustar a pressão de teste definida pelo plano de ensaios. Nesse momento anotava-se também a temperatura do líquido na entrada do injetor e as condições da sala como temperatura e pressão atmosférica local, além da temperatura da atmosfera da campânula.

Com isso estabelecido iniciava-se então a varredura de várias coordenadas  $P(x, y, z)$  pelo controle da mesa de coordenadas. O comando era feito através de controle computadorizado de motores de passo, posicionando os pontos nos três eixos ortogonais. Variando-se as coordenadas fazia-se a leitura da velocidade, diâmetro da gotícula e várias outras características do spray adquiridas pelo programa de aquisição de dados do medidor PDI da Artium, no ponto de medição. Posteriormente os dados consolidados eram então processados para levantamento das médias estatísticas e informações sobre as medições. Cerca de 40 medições eram feitas para a varredura em várias posições. O líquido de teste era então modificado, rotinizando esse procedimento básico. A sequência dos ensaios é apresentada em detalhes no ANEXO 5 – Roteiro de ensaios padrão.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O banco de dados, necessário ao propósito desta tese, foi organizado de forma a priorizar a obtenção e cálculo dos parâmetros adimensionais “ $\pi$ ” envolvidos no fenômeno e relacionados no capítulo 4. Para tal o levantamento de dados passou por 2 fases distintas. A primeira bateria de ensaios, denominada de preliminar, visava a observação do fenômeno, padronização de testes, o aprendizado sobre o aparato e seus limites. A fase seguinte foi dedicada aos ensaios propriamente ditos e montagem do banco de dados.

Os resultados foram organizados em uma planilha contendo os dados de entrada como as variáveis medidas, cálculos intermediários e resultados dos parâmetros “ $\pi$ ”. Com esta formação o banco com os parâmetros adimensionais foram introduzidos em programa de computador para análise estatística, denominado Statistica®, da empresa de programas Statsoft. O objetivo final, como mencionado no item 2.5, era a confirmação ou não da hipótese de se lograr uma correlação estatisticamente confiável e útil à engenharia de atomização e injetores. Nos itens à seguir serão apresentados os resultados de cada uma das fases dos ensaios.

### 5.1 RESULTADOS DA FASE 1 – TESTES PELIMINARES

#### 5.1.1 Testes Preliminares

Primeiramente foram feitos ensaios exploratórios utilizando água desmineralizada como fluido de teste. Essa escolha baseou-se na facilidade de manuseio e segurança que a água oferece. Vale lembrar que a maioria dos fluidos a serem testados era de combustíveis, gerando uma mistura carburada entre as gotículas e “ar”, o que envolveria questões de segurança. Apesar do aparato de ensaios dispor de purga de nitrogênio, o uso da água foi escolhido então por

precaução. Além disso, os resultados desta fase indicaram conclusões importantes que foram utilizadas nas etapas seguintes, como por exemplo, a rotina de ensaios.

Os objetivos dos testes preliminares foram:

- escolha da zona de medição;
- aperfeiçoamento da metodologia e definição da rotina de ensaios;
- verificação e solução de problemas da bancada de ensaios;
- ajuste de vedação do sistema de purga de nitrogênio;
- segurança operacional e desempenho da câmara de spray;

### 5.1.2 Escolha da zona de medição

Para tornar a rotina de ensaios padrão mais eficaz e mais rápida era necessário constatar a existência de uma região que fosse representativa do comportamento de todo o spray. Para tal buscou-se a identificação da zona de medição, conforme comenta Souza (2003) em seu trabalho sobre atomizadores do tipo duplo-fluido. Os critérios para tal foram baseados na constatação da simetria do spray, a identificação de uma zona de “coroa”, em que há o predomínio de gotículas do spray cônico oco e a distância a jusante do orifício. A seguir são apresentados os resultados que suportaram essas constatações.

#### 5.1.2.1 Simetria do spray.

Considerando o desenho dos injetores usados neste trabalho, apresentado na figura 13, observa-se que o atomizador do injetor possui geometria cilíndrica e portanto simétrica. O fluxo de líquido por todo o canal do atomizador, à montante do orifício de descarga, possui geometria de revolução e por isso também simétrica. Naturalmente isso induz a conclusão de que o spray gerado também o seria. Tal confirmação veio com os ensaios exploratórios feitos com água desmineralizada. As figuras 23 e 24 mostram os perfis de velocidades em função

da distância do eixo central, principal do spray. Observa-se os resultados com os ensaios nas pressões de 4 MPa e 6 MPa (aproximadamente 40 e 60 Bar), com varredura de medição em um diâmetro localizado a 40 mm do orifício de descarga.

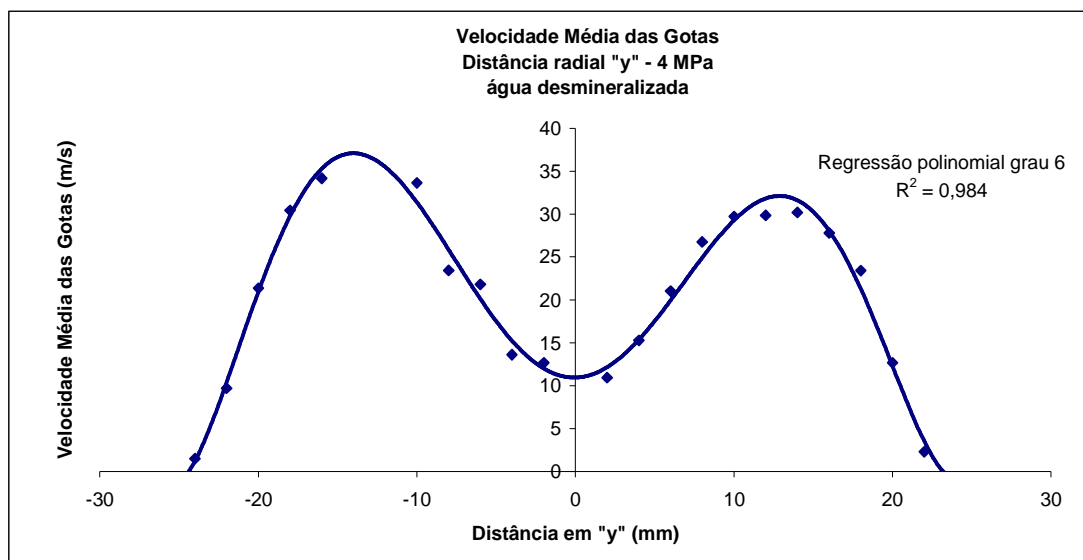


FIGURA 23 – VELOCIDADE. VARREDURA DIAMETRAL. ÁGUA DESMINERALIZADA, PRESSÃO DE 4 MPA

Na figura 24 apresentam-se os resultados na pressão de 6 MPa. Da mesma forma observa-se uma simetria qualitativa do spray no que se refere ao campo de velocidades.

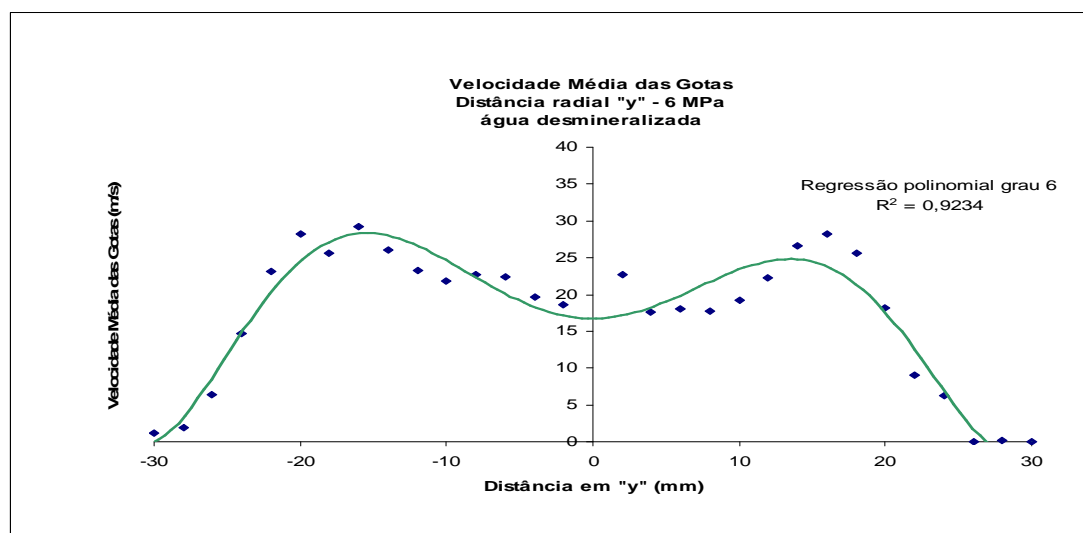


FIGURA 24 – VELOCIDADE. VARREDURA DIAMETRAL . ÁGUA DESMINERALIZADA, PRESSÃO DE 6 MPA

A figura 25 apresenta os resultados de diâmetro médio estatístico obtidos das gotículas (SMD) nos ensaios com água e na pressão de 6 MPa. Da mesma

forma pode-se observar uma simetria qualitativa quando se considera o diâmetro do spray.

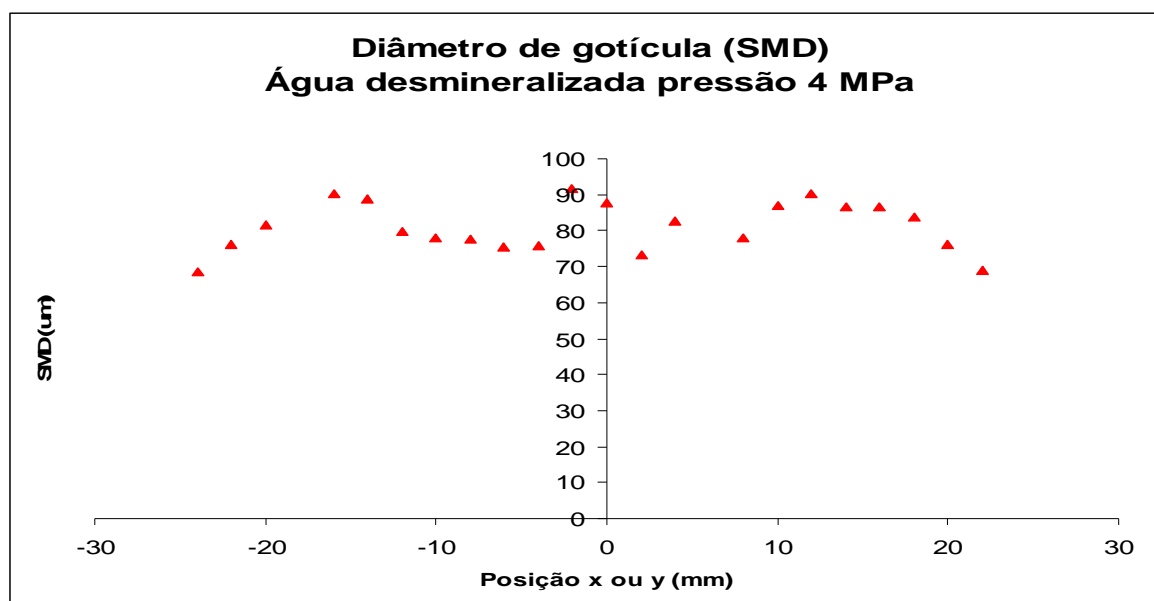


FIGURA 25 – DIÂMETRO (SMD) VARREDURA DIAMETRAL. ÁGUA DESMINERALIZADA, PRESSÃO DE 6 MPA

Mas a constatação qualitativa da simetria não bastava, era necessária uma evidência estatística. Com a confirmação da simetria os ensaios poderiam ser reduzidos substancialmente, já que as medições poderiam ser feitas em um raio apenas. Para tal os resultados foram submetidos a testes de hipóteses com análise das médias e desvios.

Sejam as médias  $\mu_1$  e  $\mu_2$  das velocidades em duas “populações” de gotículas, localizadas nos dois “lados”, ou raios do diâmetro. Sejam  $+R$  e  $-R$  as leituras feitas respectivamente na coordenada “x” positivo e negativo.

As hipóteses a serem estatisticamente testadas foram:

- a hipótese nula  $H_0$ , de que as velocidades médias são iguais nas duas populações (grupos), que comprovaria a simetria, ou seja,  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$ , as velocidades médias são iguais, ficando provada a simetria;
- a hipótese  $H_1$ , alternativa à nula, de que não existe simetria, ou seja,  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$ .

Considerando as velocidades em cada posição do gráfico da figura 25, tem-se que a média amostral no semi-eixo negativo é de 19,27 m/s, com desvio

padrão de 6,57. No semi-eixo positivo tem-se média de 18,99 m/s e desvio padrão de 9,02. No caso específico não se conhece a variância populacional e o tamanho da amostra é pequeno, com menos de 30 ensaios. Portanto o procedimento estatístico indicado é o teste “t” de Student, uma vez que os dados seguem a distribuição Gaussiana de probabilidade. Com isso aplicou-se um teste “t” de Student bicaudal com a hipótese  $H_1$  (médias diferentes). O teste de hipóteses forneceu o valor  $p = 0,08$ , logo tem-se que a probabilidade de erro ao rejeitar a hipótese  $H_1$  é de aproximadamente 8%. Dessa forma, com o valor  $p = 0,08$ , pode-se aceitar  $H_0$ , pois em geral, a linha de corte para tal decisão é de 0,05. Então, com base no teste estatístico “t” aceita-se que as médias populacionais são iguais e o serão em cerca de 9 de cada 10 ensaios. Com isso fica constatada estatisticamente a simetria para velocidades.

Outra característica importante observada nos testes exploratórios foi o número de Ohnesorge  $Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re}$  calculado no orifício de descarga. Embora o objetivo deste trabalho tenha focado a região do spray totalmente desenvolvido, os ensaios preliminares serviram também para a classificação do mecanismo de instabilidade do filme no limiar da ruptura. A observação conjunta do número de Ohnesorge e o número de Reynolds indicam o mecanismo de formação da instabilidade do filme (LEFEBVRE, 1989, p.44). Nos ensaios com água observaram-se valores de médios de  $Oh = 1,342 \cdot 10^{-4}$  e  $Re = 13.900$ . Com isso, pela classificação de Lefebvre tem-se o segundo mecanismo de quebra por interação líquido e a atmosfera que o envolve. O autor define que “as instabilidades da superfície do filme são de pequeno comprimento de onda. São causadas pelo movimento relativo do filme na atmosfera presente. O crescimento da perturbação (onda) vibracional da superfície do líquido concorre com a tensão superficial. A quebra ocorre vários diâmetros a jusante da descarga do orifício, produzindo gotículas muito menores do que a espessura do filme”. Essa classificação confere cabalmente com o spray estudado, característico do atomizador cônico oco usado em injetores.

### 5.1.2.2 Zona de “coroa”

Os resultados dos testes preliminares mostraram também a predominância de gotículas na região anular do spray. Essa constatação já era esperada, pois trata-se de um spray cônico oco e a projeção de gotículas no plano horizontal caracteriza uma coroa circular. Uma das saídas do analisador a laser (PDI) é o número de gotículas válidas coletadas em um intervalo de tempo fixo, no caso, adotado 10 segundos. Os resultados de uma varredura diametral apresentam também uma indicação qualitativa da zona de coroa, caracterizados pelo número de gotas “contadas” no período de aquisição de dados do medidor PDI da Artium.

Observa-se na figura 26 os resultados da contagem de gotículas (ordenada) em função da distância do eixo central (abscissa) a cinco pressões de teste, respectivamente 1, 2, 4, 6 e 8 MPa.

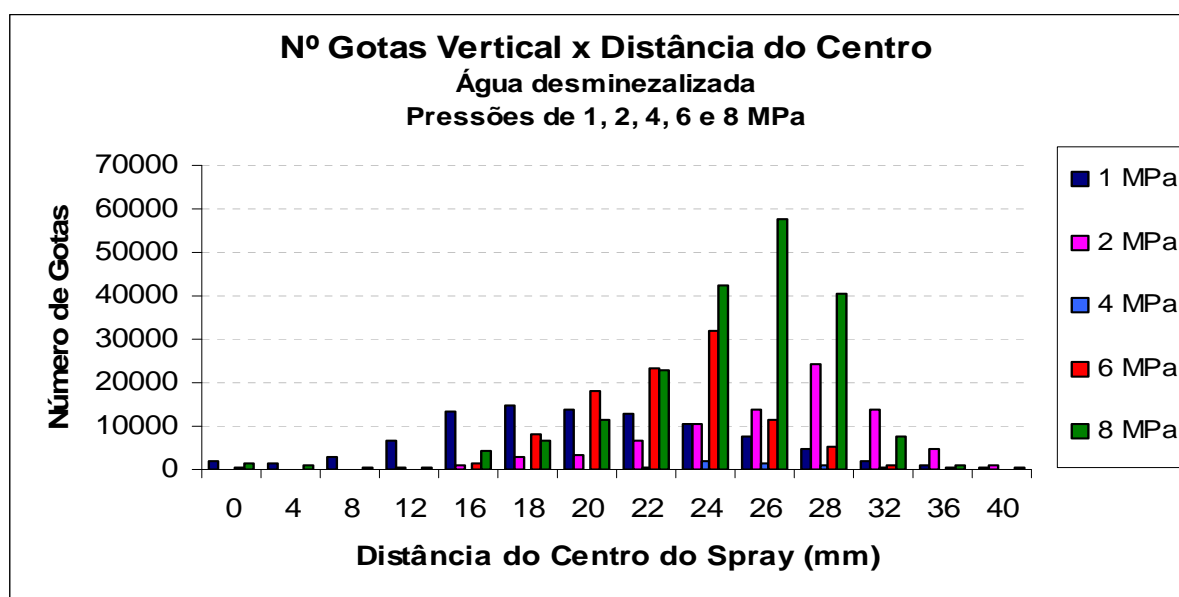


FIGURA 26 – CONTAGEM DE GOTÍCULAS EM 10 S. ÁGUA DESMINERALIZADA; VÁRIAS PRESSÕES

Pode-se observar a caracterização da presença da coroa, entre as coordenadas 18 a 32 mm do centro. Na figura 27 apresenta-se uma separata do gráfico da figura anterior. Nela pode-se observar o ensaio a pressão de 6 MPa, com a água, fluido usado nesta fase.



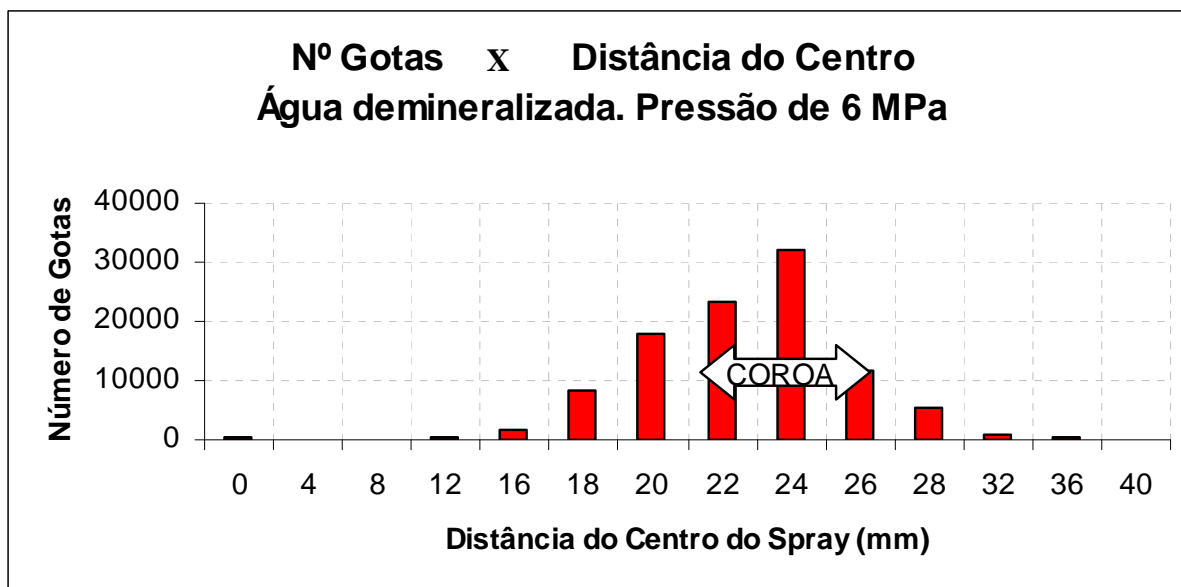


FIGURA 27 – CONTAGEM DE GOTÍCULAS EM 10 S. ÁGUA DESMINERALIZADA. PRESSÃO DE 6 MPa

De forma ilustrativa os resultados dessa fase de ensaios podem ser resumidos no desenho da figura 28. Sabe-se que ocorrem gotículas no interior do spray, conforme a figura 26, com velocidades e diâmetros comensuráveis. O que se quer ressaltar, contudo, é a predominância de gotículas na zona de coroa e, por conseguinte, maior vazão mássica nesta região.

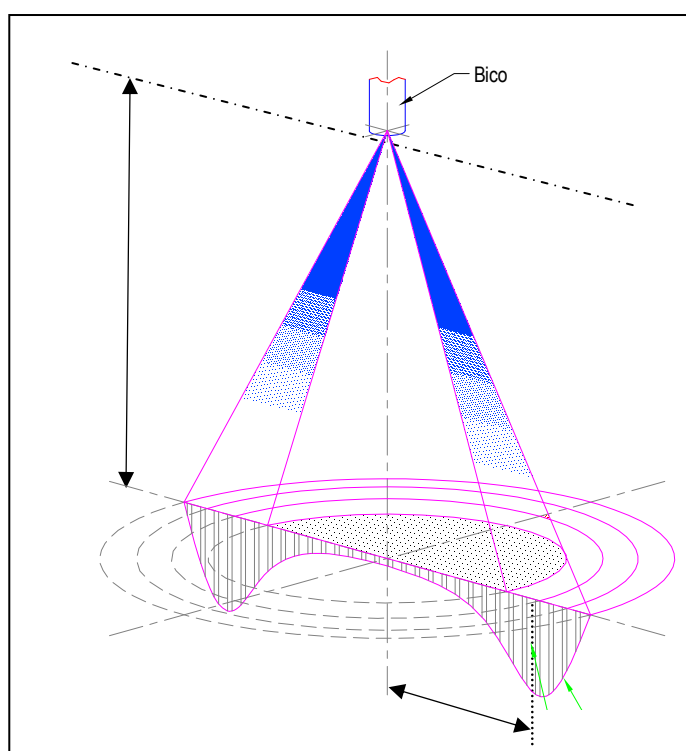


FIGURA 28 – ZONA DE MEDIÇÃO

### 5.1.2.3 Distância à jusante do orifício de descarga

Com o objetivo de se estudar as principais características do spray ao longo do eixo principal (eixo de simetria “Z”), vários ensaios foram efetuados variando-se a distância do ponto de leitura ao orifício de descarga. A figura 29 apresenta ensaios feitos com água à pressão fixa de 1 MPa. As curvas indicam leituras feitas nas distâncias de 20, 25, 30 e 35 mm no eixo Z. Cada ponto do gráfico corresponde a uma média de três medições consecutivas na mesma localização do spray. Pode-se observar uma atenuação do campo de velocidades à medida que se afasta do orifício de descarga. Provavelmente por efeito de atrito com o ar as velocidades médias caem gradativamente. Para efeito de orientação o sistema de coordenadas utilizado nos ensaios pode ser visto na figura 12 já apresentada.

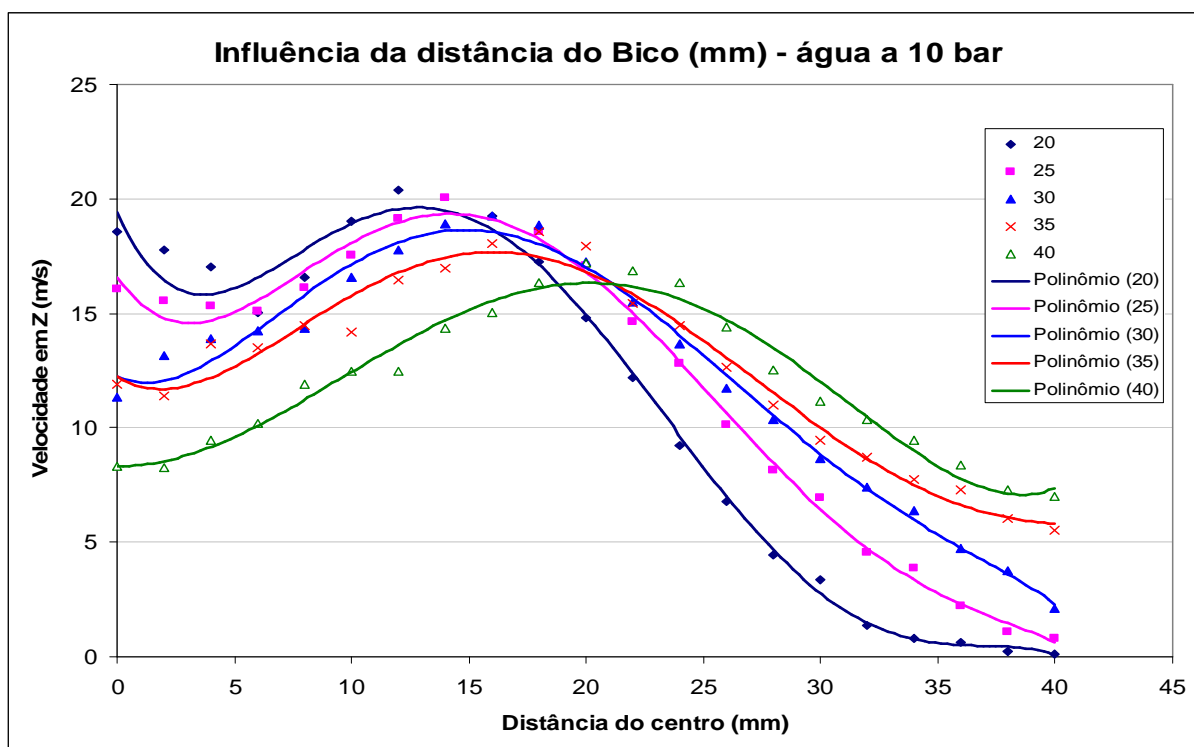


FIGURA 29- CURVA DE VELOCIDADE x DISTÂNCIA RADIAL (X) ;PRESSÃO DE 1 MPa; VÁRIAS DISTÂNCIAS VERTICAIS (Z) DO ORIFÍCIO DE DESCARGA.

Observando-se os resultados pode-se confirmar:

- Como se trata de um spray cônico oco, à medida que se afasta do orifício de descarga o raio da “coroa” aumenta, obviamente. Observa-se que a 20

mm da descarga (coordenada Z), a velocidade das gotículas atinge 19 m/s (aproximadamente). Este máximo de velocidade ocorre na chamada zona de coroa, com distância radial de 13 mm para  $z = 20$  mm.

- As velocidades caem à medida que as partículas se afastam da descarga. A uma distância de  $Z=40$  mm do orifício o pico de velocidade atinge 16 m/s, na posição radial  $X= 22$  mm.

- À medida que se afasta da descarga o raio da coroa aumenta. A  $z = 40$  mm o raio tem cerca de 22 mm.

- Pode-se estimar o ângulo do spray, dessa forma. No caso da zona central da coroa o semi-ângulo é de 24 graus.

- A velocidade na coroa, relativamente à velocidade no centro do spray, aumenta à medida que se afasta da descarga. A  $Z = 20$  mm a velocidade é apenas 20% superior, enquanto que a 40 mm chega a ser de 100%.

Um ponto importante na escolha da distância de 40 mm como referencial nos ensaios é a zona de interação com o ar de combustão quando este adentra o motor de combustão interna. Nos coletores de admissão presentes em veículos de rua ou mesmo de competição o diâmetro do coletor de admissão de cada cilindro raramente supera 50 mm. É, portanto, na distância de 40 mm a jusante da descarga que ocorre, convencionalmente, a interação com o ar para a formação da mistura carburada. Dessa forma justifica-se a escolha dessa região de medição como característica do spray. A posição referencial  $Z = 40$  mm foi escolhida pelos motivos acima, mas outras distâncias também foram consideradas nos ensaios, de forma a dar a variabilidade necessária aos experimentos.

### 5.1.3 Roteiro de ensaio – padrão

Com as conclusões obtidas na FASE 1 foi possível elaborar um roteiro de ensaios padrão a ser empregado na FASE 2, mais extensa, baseada em um planejamento quase fatorial. A abordagem era, entretanto, variar tudo ao mesmo tempo e observar o comportamento das características de interesse. Como os parâmetros adimensionais “ $\pi$ ”, organizados pelo Teorema dos PI de Buckingham,

eram razões dessas variáveis, denominadas “independentes”, indiretamente os “ $\pi$ 's” também sofreriam variação. Com isso poderiam ser então observadas as variáveis “dependentes” de interesse, no caso, o campo de diâmetros e o de velocidades.

A organização do banco teve como critério a árvore de ensaios apresentada na tabela 5. Os fatores que sofreram variação foram o diâmetro do orifício de descarga do injetor, as propriedades do líquido, a pressão e a posição de medição no spray.

Alguns parâmetros, entretanto, foram assumidos constantes, a saber:

- Tipo de injetor: injetor de sistema MPFI com atomizador do tipo mecânico –centrífugo, utilizado em motores de ciclo OTTO (à centelha). Geometria definida, diâmetro do orifício de descarga medido em projetor de perfis micrométrico e cilindros-padrão passa-não–passa. Fabricante: BOSCH.
- Meio de descarga: ar atmosférico com purga de nitrogênio. Mistura final com menos de 0,5% de  $O_2$  (vol/vol) para evitar o risco de detonação da mistura quando se testou líquido inflamável.
- Temperatura do meio de descarga: ambiente, medido por termômetro do tipo PT-100, calibrado e certificado.
- Temperatura do fluido de teste: ambiente, medido por termômetro do tipo PT-100, calibrado e certificado.
- Pressão do meio: atmosférica, obtida de barômetro, para cada bateria de ensaios (parte da manhã, tarde, noite ou madrugada). Pressão barométrica média referencial da cidade de São Mateus do Sul-PR: 92500 Pa (abs).

<b>Bico injetor</b>	Principal variável : diâmetro da descarga $d_0$ ; Níveis: 06; injetores BB01, BB02, BB03, BB04, BB05 e BB11 (tabela 6)	
	<b>Fluidos de teste</b>	Principais variáveis: densidade, tensão superficial e viscosidade Níveis: 09; Fluidos de FL1 a FL9
	<b>Pressões</b>	Principal variável : pressão; Níveis : 05; pressões de 1, 2, 4, 6 e 8 MPa (1 MPa = 10,197 kgf/cm <sup>2</sup> ),
	<b>Pontos do spray p(x,y,z)</b>	Principal variável : posição Níveis: 12; posições no spray Varredura no eixo Y ( 4, 8, 12, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 32 e 36 mm) com Z= 40mm (cte)

TABELA 5 - ÁRVORE DE ENSAIOS COM AS VARIÁVEIS E NÍVEIS PARA PLANEJAMENTO FATORIAL

O roteiro final de ensaios, passo a passo, é apresentado em detalhes no ANEXO 5, na forma de blocos seqüenciais. Para o correto posicionamento do ponto de medição (volume de controle estabelecido pelo cruzamento das barras de luz Laser) foi utilizada uma mesa de coordenadas acionada por motores de passo. O ANEXO 4 apresenta a lista de equipamentos principais da bancada de ensaios.

Um procedimento importante no início de cada ensaio era o alinhamento do orifício de descarga de forma a ajustar a origem do sistema de coordenadas ( $x=y=z=$  zero). A figura 30 apresenta o alinhamento da barra de laser exatamente no orifício de descarga.

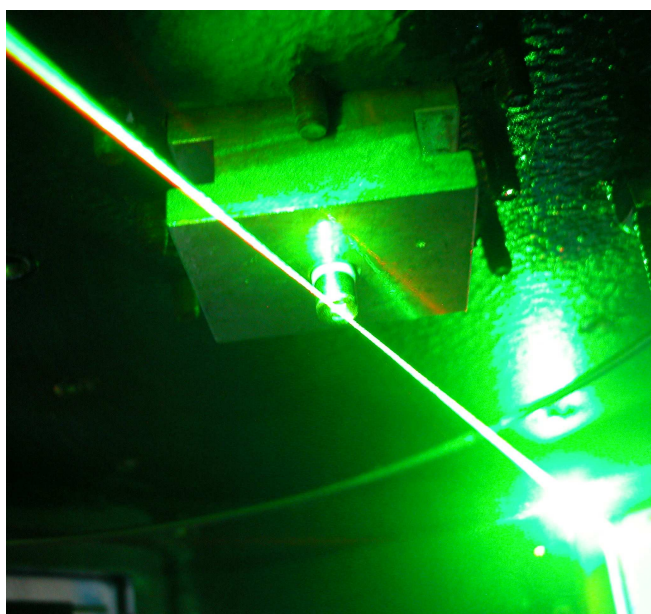


FIGURA 30- ALINHAMENTO A LASER DO SISTEMA DE COORDENADAS

#### 5.1.3.1 Lista de injetores- diâmetros

Para os ensaios foram disponibilizados 11 injetores do mesmo tipo e fabricante. A caracterização é de spray cônico OCO, conforme descrito no capítulo 3, anteriormente apresentado. A lista categorizada dos injetores é apresentada na tabela 6 a seguir, estando indicadas as peças utilizadas na FASE 2 de ensaios. Resumindo:

O menor diâmetro de descarga: 0,568 mm

O maior diâmetro: 0,614 mm

O diâmetro médio: 0,590 mm

Incerteza média do método de medição: 0,014 mm

Método de medição: projetor de perfil

Lista de Injetores Disponíveis			
Identificação	Orifício mm	Incerteza mm	Utilizados nos ensaios
BB-11	0,568	0,015	v
BB-12	0,576	0,015	
BB-09	0,577	0,014	
BB-13	0,579	0,015	
BB-03	0,584	0,012	v
BB-05	0,585	0,012	v
BB-06	0,592	0,016	
BB-07	0,594	0,012	
BB-10	0,597	0,014	
BB-01	0,598	0,013	v
BB-08	0,599	0,014	
BB-02	0,606	0,013	v
BB-04	0,614	0,012	v

TABELA 6 – INJETORES UTILIZADOS

#### 5.1.3.2 Lista de líquidos

Conforme já comentado no item 4.5.4 para que pudesse variar as propriedades físicas dos fluidos de teste, foram utilizados um total de 9 líquidos, listados de FL1 a FL9 abaixo, na tabela 7. São líquidos reais, incluindo substâncias simples, combustíveis e misturas especialmente formuladas para que se obtivesse a variância das propriedades.

Identif	Líquidos	Valores Reais (medidos em laboratório)				
		Massa específica	Viscosidade		Tensão Superficial	
		$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$ (10 °C) (cSt)	$\nu$ (25 °C) (cSt)	$\sigma$ (10 °C) (mN/m)	$\sigma$ (25 °C) (mN/m)
FL1	ISO - OCTANO	687,8	0,72	0,63	20,8	19,2
FL2	Alcoolido	699,0	0,77	0,66	20,4	18,4
FL3	ETANOL	806,8	2,28	1,6	23,2	22,1
FL4	ETANOL ANIDRO	795,1	1,95	1,46	24,5	23,4
FL5	ÁGUA DESMINERALIZADA	997,84	1,31	1,00	74,22	72,74
FL6	ÁGUA (40%) + GLICERINA (60%)	1149,2	14,55	7,47	54,5	54,3
FL7	ÁGUA (50%) + GLICERINA (50%)	1124,1	7,62	4,27	55,5	56,6
FL8	Gasolina 1	750,17	0,80	0,67	22,4	21,9
FL9	Gasolina 2	752,03	1,09	0,67	23,1	21,5

TABELA 7 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS DE TESE UTILIZADOS  
FONTE: CERTIFICADOS DE ENSAIO LABORATORIAIS.

São apresentados na figuras 31, 32 e 33 abaixo os valores das três principais propriedades dos fluidos: massa específica, viscosidade cinemática e tensão superficial dos líquidos utilizados nos ensaios.

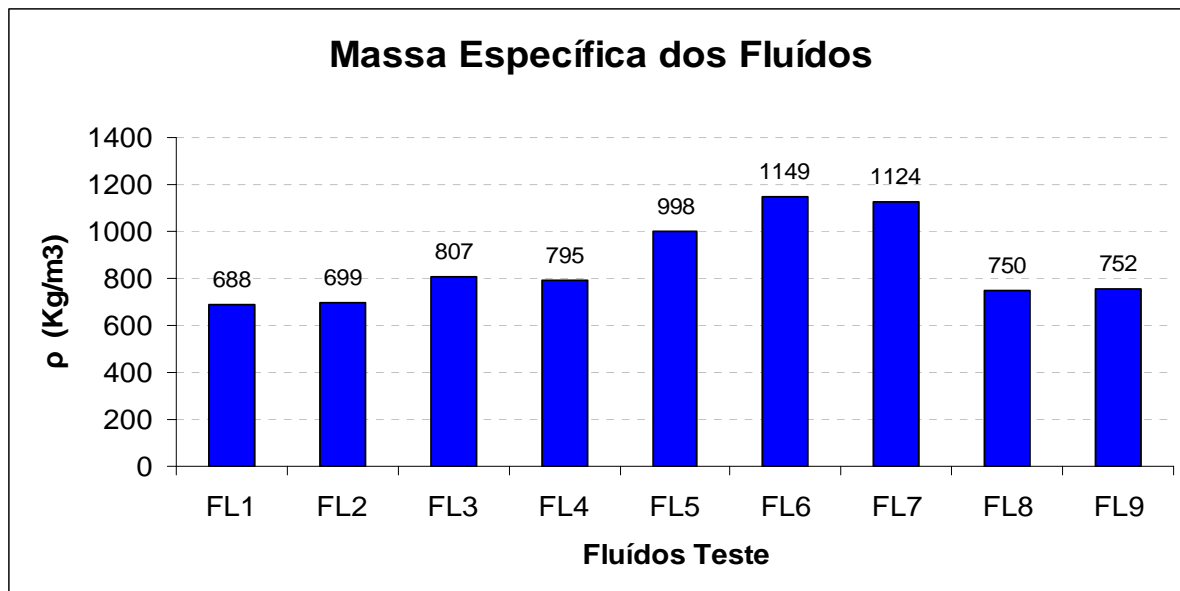


FIGURA 31 - MASSA ESPECÍFICA DOS FLUIDOS DE TESTE A 20°C - VALORES MEDIDOS

Nota: lista de lista de fluidos na tabela 7

Os valores de viscosidade, por sua vez, são apresentados na figura 32, também a duas temperaturas.

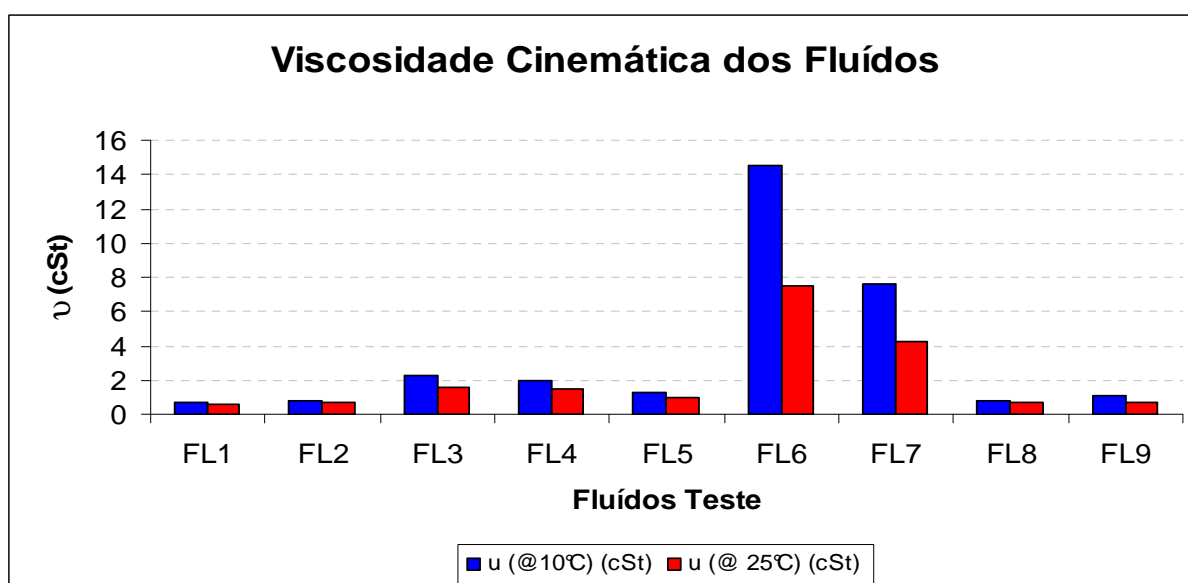


FIGURA 32 - VISCOSIDADE DOS FLUIDOS DE TESTE NAS TEMPERATURAS DE 10°C E 25°C- VALORES MEDIDOS

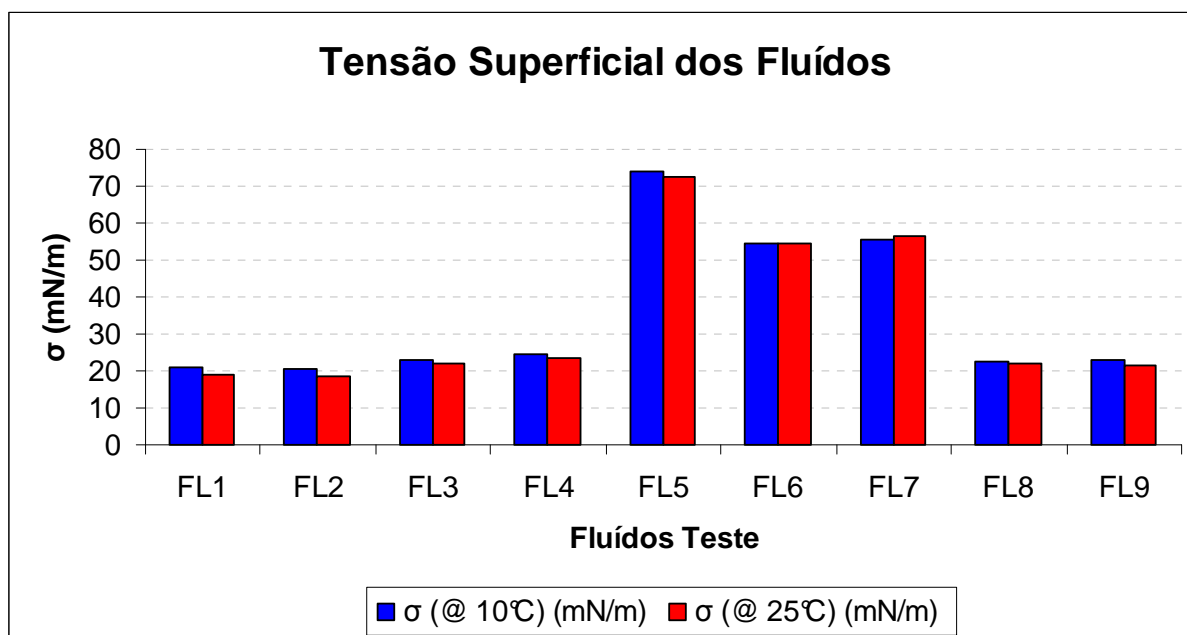


FIGURA 33 - TENSÃO SUPERFICIAL DOS FLUIDOS DE TESTE NAS TEMPERATURAS DE 10°C E 25°C - VALORES MEDIDOS (lista de fluidos na tabela 7)

Observando os dados apresentados na tabela 3, com as propriedades dos fluidos de teste obtidas de referências (teóricas) e os das figuras 31, 32 e 33, com valores medidos em laboratório, percebe-se uma discrepância importante. O uso de valores obtidos em bibliografia ou simuladores de processo pode gerar erros significativos. Sobretudo para misturas, como o caso de muitos combustíveis como gasolina e diesel, pelas diferenças observadas, não se recomenda o uso de referências, mas medições efetivas em laboratório.

A tabela 8 apresenta uma classificação dos fluidos segundo valores crescentes das propriedades em questão. Esta tabela é especialmente importante nas análises dos resultados da velocidade e diâmetro das gotículas do spray.

massa específica	FL1	FL2	FL8	FL9	FL4	FL3	FL5	FL7	FL6
tensão superficial	FL2	FL1	FL9	FL8	FL3	FL4	FL6	FL7	FL5
viscosidade	FL1	FL2	FL8	FL9	FL5	FL4	FL3	FL7	FL6

TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE TESTE SEGUNDO PROPRIEDADES CRESCENTES- VALORES MEDIDOS



### 5.1.3.3 Pressões

Nos ensaios optou-se por aplicar as pressões entorno da pressão de projeto do injetor considerado, limitando-se os valores aos sistemas de bombeamento do combustível. No caso dos injetores utilizados nos ensaios, a pressão de trabalho estaria entorno de 4 MPa manométrica (aproximadamente 40 bar). Ao final as pressões de referência escolhidas foram 1, 2, 3, 4, 6 e 8 MPa.

### 5.1.3.4 Posições

A figura 34 apresenta um desenho esquemático de montagem do medidor a Laser Artium, visto de cima. Pode-se observar a orientação de montagem do transmissor de raios laser e o receptor frontal de luz perturbada (*“forward scattering”*). Além disso, apresenta-se a região de maior densidade de gotículas do spray (coroa), identificada na fase de testes exploratórios. Esta zona teve especial atenção, conforme descrito no roteiro de ensaios padrão.

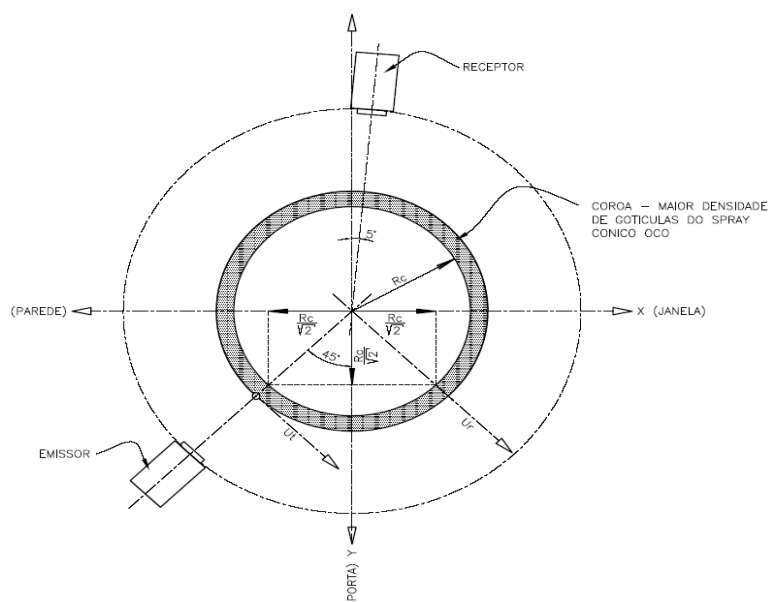


FIGURA 34 – ORIENTAÇÃO DE MONTAGEM - VISTA SUPERIOR

## 5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS- FASE 2

Durante a fase 2 de ensaios trabalhou-se com um banco de dados mais extenso, segundo um planejamento fatorial. Para tal aplicou-se o procedimento padrão de ensaios conforme mostrado no anexo 5. Foram feitos cerca de 500 ensaios com 9 fluidos conforme descrito no item 5.1.3. O plano de ensaios foi denominado de “quase-fatorial” pelo fato de algumas posições do spray e alguns bicos injetores não terem sido testados com todos os níveis das variáveis apresentadas na tabela 5. O objetivo era variar tudo, mas de forma organizada, para posterior análise estatística e levantamento do modelo não-linear de correlação. Apresentam-se a seguir os resultados das principais características do spray, sobretudo o perfil de velocidades e do diâmetro de gotículas, que são as variáveis respostas do experimento.

### 5.2.1 Vazão nos injetores

Um dos experimentos necessários do roteiro de ensaios padrão é a medição da vazão no injetor. A figura 35 apresenta as variáveis pressão e vazão de todos os injetores testados com os respectivos fluidos de teste FL1 a FL9. Como já era de se esperar o comportamento das curvas é quadrático uma vez que a vazão varia com a raiz da pressão. Observam-se maiores vazões mássicas com os líquidos mais densos, naturalmente. Concorre com essa propriedade, entretanto, a viscosidade, que explica os resultados dos fluidos FL7 e FL6, misturas de água e glicerina. Os ensaios geraram pontos discretos, as linhas de tendência foram lançadas no gráfico apenas por ilustração.

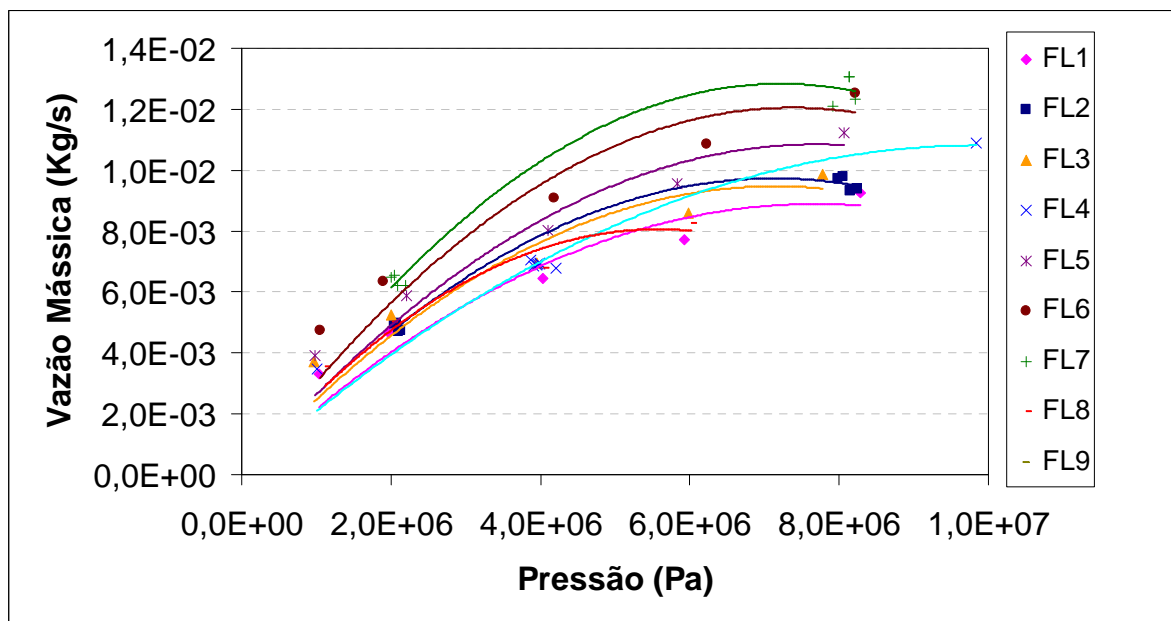


FIGURA 35 – CURVA PRESSÃO x VAZÃO DOS INJETORES COM DIFERENTES FLUIDOS DE TESTE (lista de fluidos na tabela 7)

Com os resultados foi possível obter-se o número de fluxo  $F_n$  médio dos injetores utilizados. O  $F_n$  representa a “característica de fluxo” de um atomizador e encerra em um valor discreto a razão entre vazão, tipo de fluido e pressão, conforme comenta Lefebvre (1989), mais do que somente a área do orifício simplesmente. O  $F_n$  é uma característica inerente ao atomizador e seu projeto. Os valores foram obtidos pela equação 3.4, reproduzida abaixo. A tabela 9 mostra os valores medidos do coeficiente de descarga e o número de fluxo para cada injetor.

$$F_n = \frac{\dot{m}_L}{\sqrt{\Delta P \cdot \rho_L}}$$

Identificação	d <sub>0</sub> (mm)	CD	FN	Desvio médio
BB-11	0,568	0,339	1,25E-07	2,04E-09
BB-03	0,584	0,334	1,27E-07	5,66E-09
BB-05	0,585	0,327	1,25E-07	6,92E-09
BB-01	0,598	0,291	1,16E-07	3,37E-10
BB-02	0,606	0,335	1,29E-07	7,23E-10
BB-04	0,614	0,280	1,17E-07	1,13E-10

TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS DOS INJETORES UTILIZADOS

O número de fluxo médio foi de  $1,231 \cdot 10^{-7}$  com desvio padrão de 4,36%. O coeficiente de descarga baixo, em torno de 0,3, já era esperado, por tratar-se de uma característica do spray cônico oco, devido à presença do núcleo de ar no orifício de descarga.

### 5.2.2 Perfil de velocidades no spray

Os ensaios para o levantamento do campo de velocidades foram os mais extensos. Todos os nove fluidos de testes foram ensaiados e alguns dos resultados seguem abaixo. Para os testes foram fixados algumas condições, já mencionadas na descrição da rotina do ensaio padrão. Os pontos de medição foram 40 mm à jusante do orifício de descarga (coordenada Z), na zona de coroa. O valor discreto de velocidade foi obtido pela média ponderada pelo número de gotículas, conforme a equação 5.1, ou seja:

$$\overline{U}_g = \frac{\sum_{xi}^{xf} (U_{(x)} \cdot ng_{(x)})}{\sum_{xi}^{xf} ng_{(x)}} \quad (5.1)$$

Sendo que  $\overline{U}_g$  é a velocidade média ponderada das gotículas,  $U(x)$  a velocidade medida na posição “X” da coroa (raio);  $ng$  o número de gotículas medidas pelo medidor a laser PDI e  $Xi$  e  $Xf$ , respectivamente as posições de início e fim da coroa.

### 5.2.2.1 Influência da pressão

A figura 36 mostra o gráfico das médias das velocidades medidas e suas respectivas dispersões com 6 fluidos de teste, em função da pressão. Nesta fase já se pôde observar qualitativamente a influência da pressão, ou seja, à medida que se eleva a pressão no injetor a velocidade média  $\bar{U}_g$  também se eleva, até um determinado valor, aparentemente de máximo, na pressão entorno de 5 MPa.

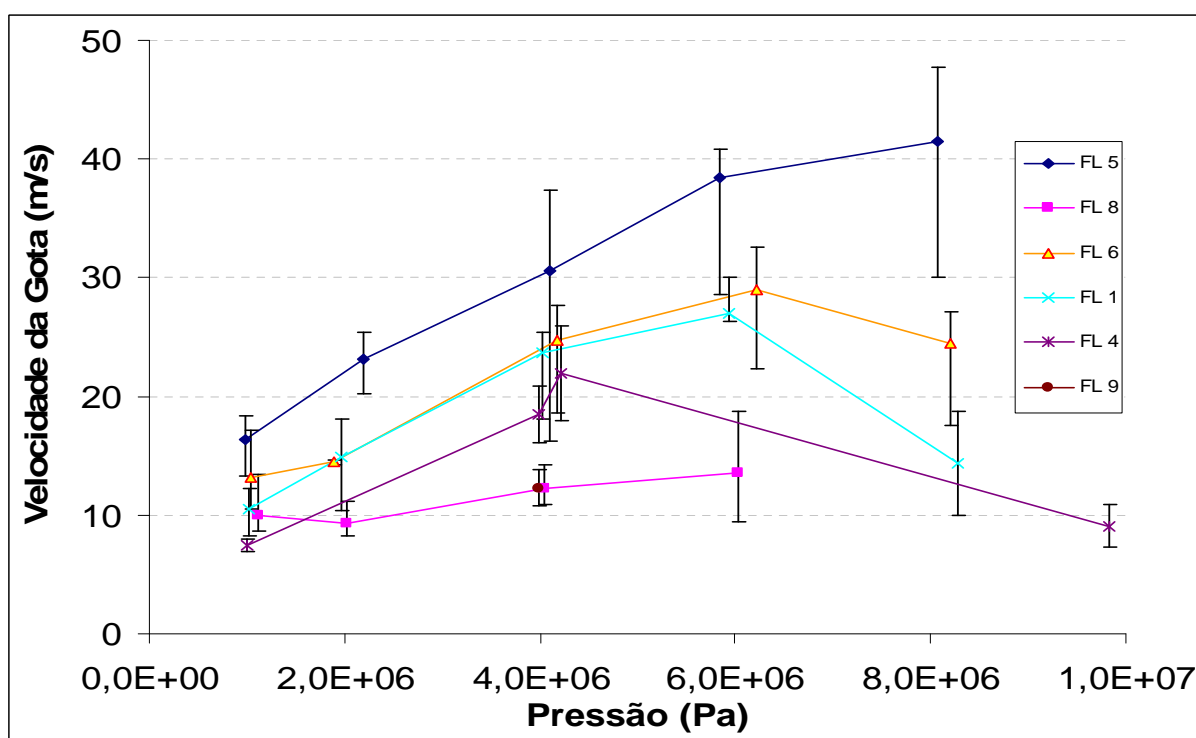


FIGURA 36 – CURVA VELOCIDADE MÉDIA x PRESSÃO, POSIÇÃO Z= 40mm ,VÁRIOS FLUIDOS, DIVERSOS BICOS (lista de fluidos na tabela 7)

Além disso, observa-se que há a influência das propriedades dos fluidos na velocidade final, resultando em diferentes comportamentos, aparentemente não-lineares.

#### 5.2.2.2 Influência das propriedades físicas

Observando-se a figura 36 e comparando com a tabela 8, que apresenta uma classificação dos fluidos segundo valores crescentes de suas propriedades, pode-se supor uma relação entre as propriedades do líquido com a velocidade final. A principal é a relação que se pode observar visualmente na figura 36, quanto ao aumento da velocidade média das gotículas com a tensão superficial. Quanto maior a tensão superficial  $\sigma$ , maior a velocidade. Isso pode ser explicado provavelmente considerando o balanço de energia total do fenômeno. A energia potencial contida no fluido à montante do orifício se transforma em energia cinética quando este flui pelo orifício. A passagem do fluido, pela rápida queda de pressão, o acelera sobremaneira, imprimindo aumento de velocidade axial e angular (efeito centrífugo). Esse fenômeno causa perturbação e instabilidade da lâmina na descarga, a principal causa precursora da atomização, conforme comentado no item 3.4. As demais forças envolvidas no fenômeno, como as de tensão superficial e de viscosidade se contrapõem às precursoras. No caso de líquidos como FL6, FL7 e FL5 da tabela 8, de maior tensão superficial, tais forças oferecem maior resistência à quebra da lâmina. Neste caso há a tendência da energia envolvida acelerar o líquido, contudo a perturbação não se sobrepõe às forças de tensão superficial resultando em menor quebra – atomização. No balanço de energia entretanto o fluido ganha mais cinética, aumentando sua velocidade. Estas análises, porém, surgiram das observações nesse estágio dos ensaios. Posteriormente, com a análise de variância “ANOVA” dos dados pode-se observar o comportamento do fenômeno e os fatores predominantes em cada caso. Esta análise foi feita e será apresentada nos próximos itens.

#### 5.2.3 Perfil de diâmetro de gotículas no spray

Com os resultados do banco de dados pôde-se avaliar o comportamento do diâmetro médio estatístico das gotículas (SMD) em função das principais

variáveis do processo de atomização. À exemplo do campo de velocidades os diâmetros foram calculados como média ponderada pelo número de partículas lidas pelo laser PDI, em um intervalo de tempo de varredura. A equação do valor discreto de  $d_g$  foi calculada pela equação (5.2) abaixo.

$$d_g = \frac{\sum_{xi}^{xf} (d_{g(x)} \cdot ng_{(x)})}{\sum_{xi}^{xf} ng_{(x)}} \quad (5.2)$$

### 5.2.3.1 Influência da pressão

Na figura 37 observa-se o comportamento do diâmetro médio das gotículas para os fluidos testados com as respectivas dispersões das medições.

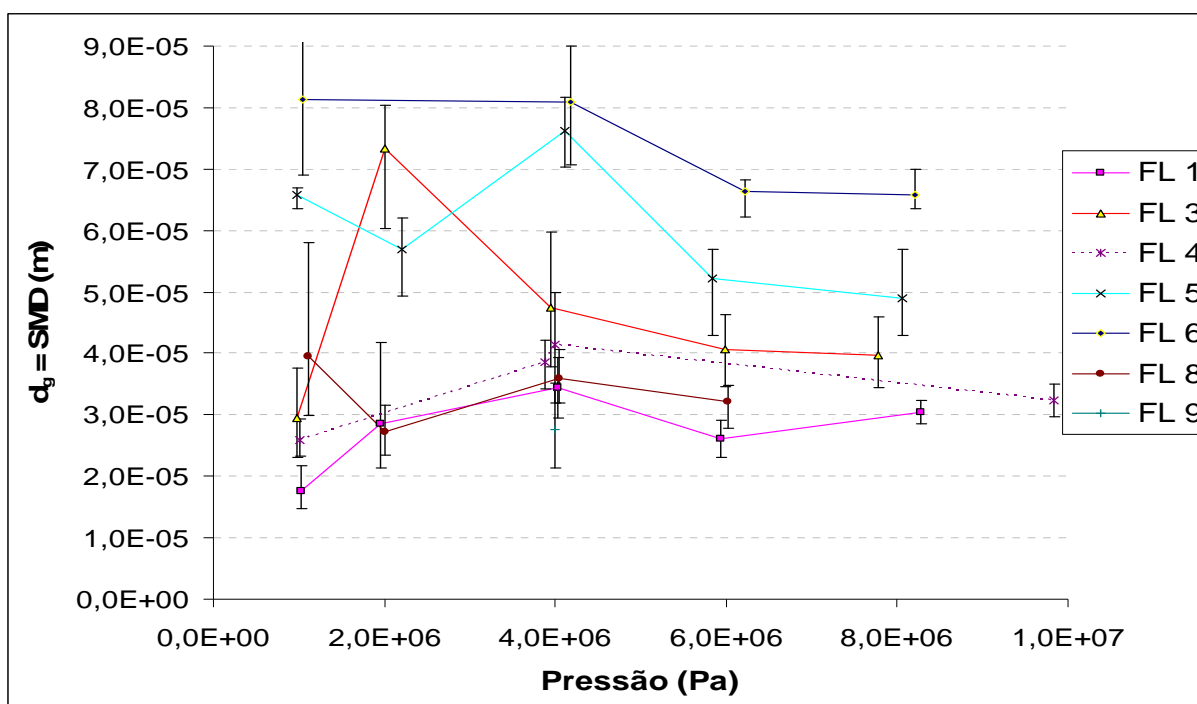


FIGURA 37 – CURVA DIÂMETRO MÉDIO DE GOTÍCULAS x PRESSÃO, POSIÇÃO Z= 40mm, DIVERSOS BICOS;  $d_g$  É A MÉDIA DO SMD DE 3 MEDIÇÕES PARA CADA CONDIÇÃO; Lista de fluidos na tabela 7.

A exemplo das considerações sobre o perfil de velocidades, pôde-se concluir que também há uma relação qualitativa entre o diâmetro médio das

gotículas com o aumento da pressão. A elevação tenderia a diminuir o SMD das gotículas. Observa-se também que os menores diâmetros são das curvas para os fluidos FL8 e FL9, as gasolinas tipo 1 e 2 testadas. Vale lembrar que os injetores tomados para estudo são comerciais, projetados para gasolina.

#### 5.2.3.2 Influência das propriedades físicas

Observando a figura 37 e a tabela 8 concluímos que há uma tendência do diâmetro  $d_g$  diminuir à medida que diminui a viscosidade do líquido. Isso já era esperado, conforme menciona Lefebvre (1996), como regra geral para a maioria dos atomizadores mecânicos e mecânicos-centrífugos. Ocorre que, pela observação, também haveria influência da massa específica do fluido ou mesmo efeitos compostos entre as propriedades. Esses efeitos, individuais e compostos, entretanto, têm comportamento qualitativamente não-linear, pelos resultados. Esse fato induz o aprofundamento estatístico e a busca de correlações baseadas em regressões não-lineares como mais aptas a explicarem o fenômeno. Na realidade, para que se pudesse confirmar as correlações, seria necessário ainda uma análise de variância, com a robustez estatística adequada.

### 5.3 MODELAGEM DAS VARIÁVEIS POR REGRESSÃO NÃO-LINEAR

Partindo-se do banco de dados e das avaliações prévias sobre as influências das grandezas, foi possível buscar as correlações desejadas para o campo de velocidades e o de diâmetros. Tomando-se as equações 4.15 e 4.16, que relacionam todos os grupos adimensionais, que agora são as variáveis explicativas do modelo de regressão tem-se:



Para velocidades

$$\frac{U_g}{U_0} = k_U \cdot \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^A \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^B \cdot Eu^C \cdot Re^D \cdot We^E \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^F$$

Da mesma forma, para o campo de diâmetros

$$\frac{d_g}{d_0} = k_d \cdot \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^G \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^H \cdot Eu^I \cdot Re^J \cdot We^K \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^L$$

Tem-se como variáveis dependentes (respostas) respectivamente os parâmetros  $U_g/U_0$  e  $d_g/d_0$  que são partes integrantes do objetivo principal deste trabalho. À direita da igualdade têm-se as variáveis independentes na forma de um produtório com as variáveis adimensionais obtidas pelo teorema dos “ $\pi$ ” de Buckingham. Nos modelos tem-se também  $k_U$  e  $k_d$  que são constantes de proporcionalidade e foram assumidas originalmente iguais à unidade, por simplificação.

Para melhor manuseio do banco de dados no programa computacional de análise estatística, a notação das equações 4.12 e 4.12a foi adaptada. Substituindo-se os parâmetros “ $\pi$ ” por P1 a P8, descritos na tabela 10 e seus respectivos expoentes a determinar, por  $b_2$  a  $b_8$  e  $c_2$  a  $c_8$ , os modelos de correlação ficaram:

Para o campo de velocidades:

$$P1 = 1 \cdot (P2)^{b_2} \cdot (P4)^{b_4} \cdot (P5)^{b_5} \cdot (P6)^{b_6} \cdot (P7)^{b_7} \cdot (P8)^{b_8} \quad (5.3)$$

E para o campo de diâmetros:

$$P3 = 1 \cdot (P2)^{c_2} \cdot (P4)^{c_4} \cdot (P5)^{c_5} \cdot (P6)^{c_6} \cdot (P7)^{c_7} \cdot (P8)^{c_8} \quad (5.4)$$

O item 4.2.9 apresenta um resumo dos parâmetros “ $\pi$ ” e para o cálculo de vários deles é necessário se conhecer a espessura do filme na região de descarga do orifício “ $t_0$ ”. No item 4.4.7 apresentou-se as principais equações para o cálculo de  $t_0$  segundo quatro propostas mencionadas pela literatura internacional, respectivamente as equações de Simmons e Harding (S&H), Risk e Lefebvre (R&L), Griffen e Muraszew (G&M) e Griffen e Risk (G&R).

Para cada uma dessas equações foi criada uma planilha de resultados que resultaram em regressões não-lineares definindo os coeficientes de “b2” a “b8” na correlação para velocidades e de “c2” a “c8” no de diâmetros. A tabela 10 apresenta uma separata da planilha de cálculo dos parâmetros “ $\pi$ ”, representados na primeira linha e por P1 a P8 na quinta linha. São mostrados, por ilustração, apenas 13 dos 463 ensaios. Os ANEXOS 6 e 7 trazem mais detalhes da planilha com o banco de dados.

$\frac{U_g}{U_0}$	$\frac{\rho_a}{\rho_L}$	$\frac{d_g}{d_0}$	$\frac{Z}{d_0}$	$\frac{P}{U_0^2 \cdot \rho_L}$	$\frac{U_0 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\mu}$	$\frac{U_0^2 \cdot \rho_L \cdot d_0}{\sigma}$	$\frac{\theta_g}{\theta}$
Parâmetros Adimensionais para estimativa da relação velocidade e diâmetro							
$U_g/U_0$	$\rho_a/\rho_L$	$d_g/d_0$	$Z/d_0$	$Eu$	$Re_0$	$We_0$	$\theta_g/\theta$
P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8
0,6832	0,0011	0,1129	68,49	1,7016	7373,76	0,9556	0,70
0,6366	0,0011	0,1131	68,49	1,6993	7399,20	0,9582	0,75
0,6025	0,0011	0,1138	68,49	1,7021	7367,37	0,9451	0,80
0,5643	0,0011	0,1135	68,49	1,7047	7338,91	0,9330	0,85
0,6980	0,0011	0,1136	68,49	1,7055	7329,54	0,9261	0,64
0,7363	0,0011	0,1145	68,49	1,7090	7290,45	0,9156	0,59
0,7496	0,0011	0,1087	68,49	1,6761	7668,48	0,9906	0,59
0,7378	0,0011	0,1107	68,49	1,6741	7691,24	0,9969	0,64
0,7362	0,0011	0,1127	68,49	1,6719	7717,79	0,9996	0,70
0,7233	0,0011	0,1130	68,49	1,6694	7748,26	1,0033	0,75
0,7029	0,0011	0,1140	68,49	1,6697	7744,47	1,0022	0,80
0,7156	0,0011	0,1152	68,49	1,6675	7771,26	1,0049	0,85
0,6652	0,0011	0,1142	68,49	1,6665	7782,93	1,0033	0,89

TABELA 10– SEPARATA DO BANCO DE DADOS – ENSAIOS USANDO A EQUAÇÃO DE RISK e LEFEBVRE

A figura 38 mostra o gráfico com um resumo da estatística das variáveis dependentes P1 e P3 e das independentes P2 e de P4 a P8.

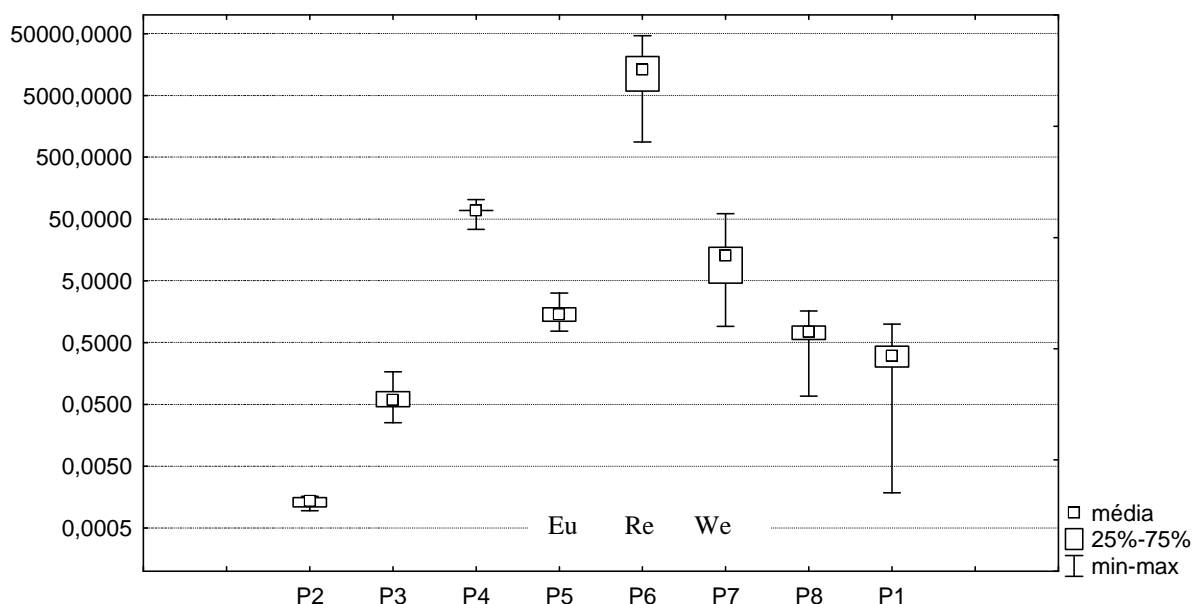


FIGURA 38 – VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS ADIMENSIONAIS DOS ENSAIOS; ESCALA LOGARÍTMICA

Especialmente os adimensionais Euler, Reynolds e Weber, representados respectivamente por P5, P6 e P7 apresentam a boa variabilidade conseguida nos ensaios. O número *Eu* de 0,76 a 3,08, passando, portanto, pela unidade. O número *Re* de 995 a 46000, desde regime laminar ao turbulento e finalmente *We* de 0,9 a 60, também passando pela unidade. Esta variabilidade é especialmente útil à análise de regimes de fluxo e avaliação de escala das forças envolvidas no fenômeno da atomização.

### 5.3.1 Modelo de Regressão para o campo de velocidades

Nesta etapa buscou-se, finalmente, o processamento dos dados do banco e a estimação dos expoentes do modelo de regressão. Além disso, procedeu-se uma avaliação geral do modelo e a escolha da equação de cálculo da espessura do filme  $t_0$  na descarga, segundo critérios estatísticos. Na verdade o processamento do banco de dados foi feito para cada uma das equações. Os respectivos modelos de regressão foram submetidos a uma avaliação por análise de variância e verificação da significância estatística dos expoentes calculados.

O método utilizado para o cálculo foi o dos mínimos quadrados que consiste em fazer com que a soma dos erros quadráticos entre a regressão e os valores medidos seja a menor possível. O algoritmo utilizado foi o de Levenberg-Marquardt que, de forma mais rápida que o método de Gauss-Newton, estima os parâmetros de modelos de regressão não-linear. O processo iterativo é indicado para banco de dados grandes como é o caso em pauta. O critério de convergência adotado foi de  $10^{-8}$  entre duas iterações consecutivas.

### 5.3.1.1 Escolha da equação para cálculo de $t_0$ para o campo de velocidades

A escolha da melhor equação de cálculo de  $t_0$  demandou o processamento do banco de dados adaptado para cada uma das equações. O critério de escolha da melhor foi, num primeiro momento, o coeficiente de determinação múltiplo " $R^2$ " e a avaliação do valor-p comparado ao nível de significância "alfa", limítrofe de 5%. Com a escolha da melhor proposta foi possível aprofundar as avaliações estatísticas do modelo de regressão eleito.

Os resultados comparativos são apresentados na tabela 11, à seguir:

Velocidades	Expoentes	Valor estimado pela regressão	Erro Standard	t-valor	p-valor	Limite inferior estimado (alfa=0,05)	Limite inferior estimado (alfa=0,05)
Simmons& Harding $R^2=0,9222$	b2	-0,304046	0,042030	-7,2340	0,000000	-0,386649	-0,221443
	b4	-0,631822	0,073158	-8,6364	0,000000	-0,775601	-0,488043
	b5	0,104450	0,145893	0,7159	0,474406	-0,182276	0,391176
	b6	0,005780	0,017652	0,3274	0,743501	-0,028912	0,040471
	b7	-0,318030	0,017938	-17,7294	0,000000	-0,353284	-0,282776
	b8	0,473034	0,038714	12,2186	0,000000	0,396947	0,549120
Risk & Lefebvre $R^2=0,9298$	b2	<b>-0,583693</b>	0,072182	-8,0864	0,000000	-0,725562	-0,441824
	b4	<b>-0,507761</b>	0,068251	-7,4397	0,000000	-0,641903	-0,373618
	b5	<b>-0,481882</b>	0,165005	-2,9204	0,003678	-0,806190	-0,157575
	b6	<b>-0,207681</b>	0,045386	-4,5759	0,000006	-0,296885	-0,118477
	b7	<b>-0,295310</b>	0,014497	-20,3700	0,000000	-0,323804	-0,266816
	b8	<b>0,423967</b>	0,031967	13,2625	0,000000	0,361137	0,486797
Griffen& Muraszew $R^2=0,9202$	b2	-0,114042	0,050494	-2,2585	0,024387	-0,213273	-0,014811
	b4	-0,669137	0,071888	-9,3081	0,000000	-0,810412	-0,527862
	b5	-0,290820	0,117025	-2,4851	0,013311	-0,520800	-0,060840
	b6	0,072940	0,016723	4,3616	0,000016	0,040076	0,105805
	b7	-0,333312	0,016565	-20,1210	0,000000	-0,365866	-0,300757
	b8	0,413957	0,036787	11,2529	0,000000	0,341663	0,486251
Griffen&Risk $R^2=0,9192$	b2	-0,083243	0,050848	-1,6371	0,102319	-0,183174	0,016689
	b4	-0,599521	0,072314	-8,2906	0,000000	-0,741638	-0,457404
	b5	-0,354310	0,122412	-2,8944	0,003985	-0,594885	-0,113734
	b6	0,062162	0,017659	3,5201	0,000476	0,027457	0,096867
	b7	-0,334654	0,016611	-20,1468	0,000000	-0,367299	-0,302009
	b8	0,431837	0,037401	11,5460	0,000000	0,358333	0,505341

TABELA 11 – RESUMO COMPARATIVO DOS MODELOS PARA O CAMPO DE VELOCIDADES SEGUNDO VARIAS PROPOSTAS DE CALCULO DE  $t_0$

Assumindo primeiramente o critério do coeficiente de determinação múltiplo  $R^2$  pode-se observar que a equação de melhor desempenho para a aplicação é a de Risk e Lefebvre (R&L). A proposta de Simmons e Harding tem coeficiente elevado também, mas o nível do valor-p dos expoentes  $b_5$  e  $b_6$  indicam que esses parâmetros PI não seriam significativos.

A melhor escolha realmente se confirma na proposta de Risk e Lefebvre. A variável dependente é o parâmetro  $P1 = U_g/U_0$  e os termos independentes os outros sete fatores conforme a equação 5.3.

### 5.3.1.2 O Modelo

Com a escolha final sobre a melhor equação de cálculo de  $t_0$ , foi possível eleger o modelo de regressão não-linear com todos os coeficientes, ora determinados, apresentado na equação (5.5) a seguir:

$$\frac{U_g}{U_0} = \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{-0,5836} \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^{-0,5077} \cdot Eu^{-0,4819} \cdot Re^{-0,2077} \cdot We^{-0,2953} \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^{0,4239} \quad (5.5)$$

Atenta-se que  $U_0$  pode ser calculado considerando-se a vazão desejada e as características geométricas do injetor.

Observando-se o valor-p e comparando com o nível de significância “alfa”=0,05 como critério, pode-se observar que todos os coeficientes (expoentes) são significativos ao nível de 5%. O valor do coeficiente de regressão  $R^2$  é de 0,9298, classificado para autores como Barbetta (2004), como uma regressão “forte”.

### 5.3.1.3 Análise do modelo de regressão obtido para o campo de velocidades

O modelo então obtido foi submetido a uma avaliação estatística para a verificação da qualidade da regressão frente ao fenômeno estudado. Primeiramente foi observada a diferença entre os valores preditos pela regressão e os medidos, contidos no banco de dados. Observa-se na figura 39 que a “nuvem” de pontos sobre a bissetriz do 1º quadrante, indicando uma tendência ascendente e forte coerência entre os valores preditos e os observados.

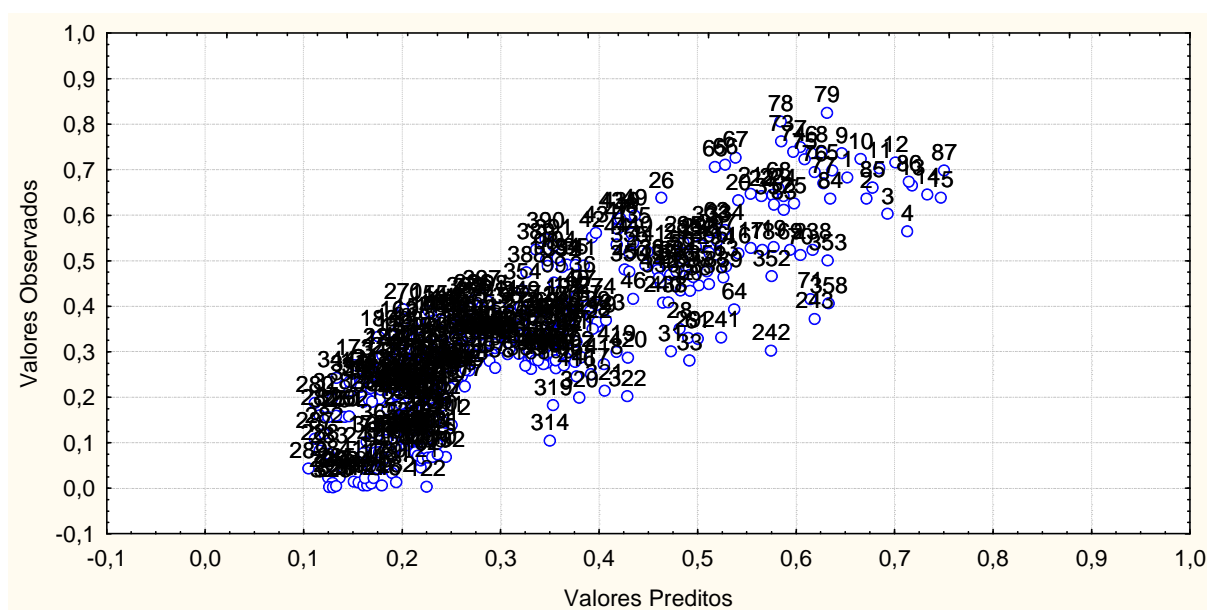


FIGURA 39 – CORRELAÇÃO ENTRE VALORES PREDITOS E OBSERVADOS REGRESSÃO NÃO-LINEAR PARA VELOCIDADES, EQUAÇÃO R&L (os algarismos sobre os pontos indicam número do ensaio)

Já na figura 40 observa-se uma “nuvem” caótica dos resíduos em relação aos valores preditos da regressão, sem componente sistemática. A distribuição ocorre entorno da nulidade de forma uniforme, indicando ruído “branco”, típico de experimentação científica.

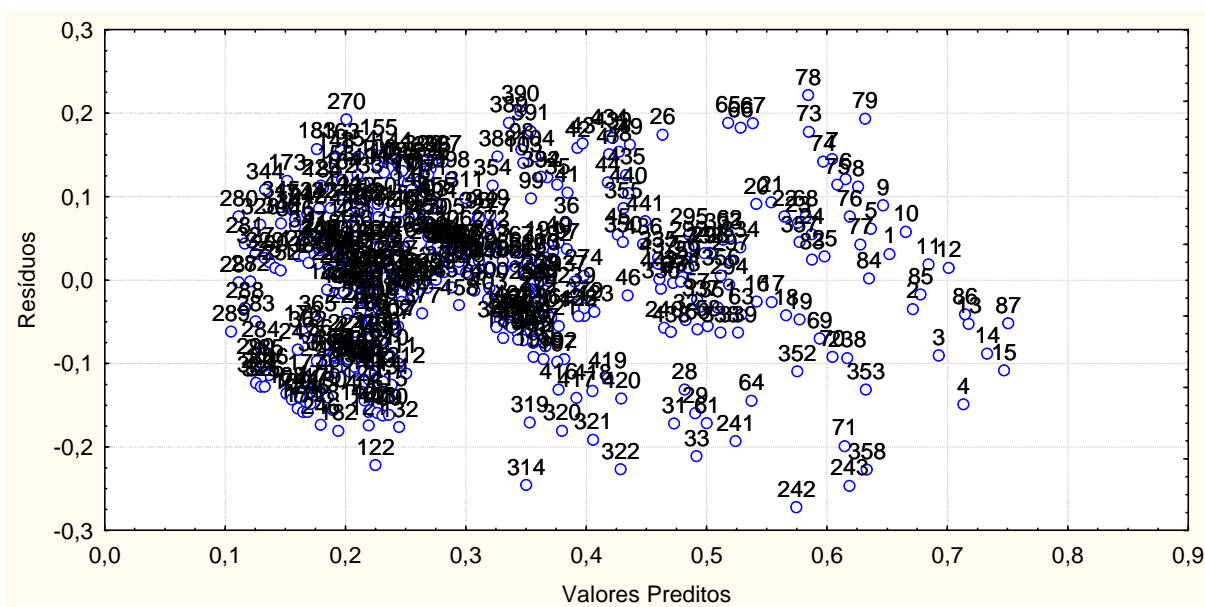


FIGURA 40 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DOS VALORES PREDITOS REGRESSÃO NÃO-LINEAR

A uniformidade de distribuição dos resíduos se confirma na figura 41 em que se observa um perfil bem próximo ao Gaussiano.

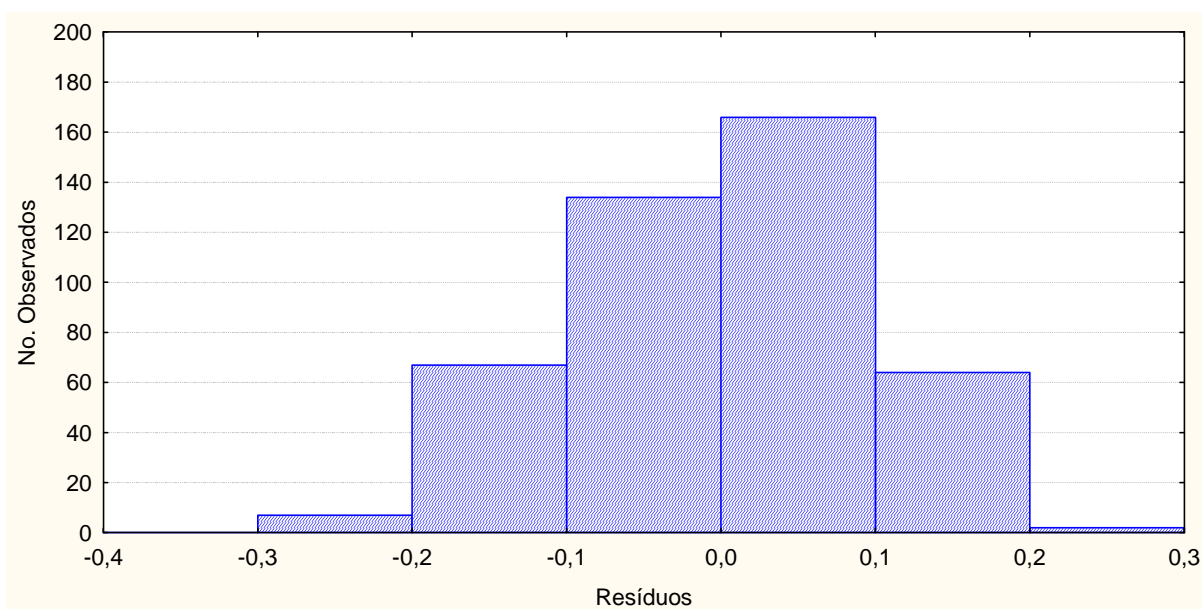


FIGURA 41 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DOS RESÍDUOS ENTRE VALORES PREDITOS E MEDIDOS

Além da avaliação dos resíduos procedeu-se uma análise de variância “ANOVA” do modelo de regressão obtido e os dados de ensaios. Esta abordagem é especialmente útil em experimentação científica, conforme mencionado no item

4.5.3 do capítulo 4. A análise consiste em dividir a variação total da variável dependente em parcelas que são então tratadas e observadas de forma sistemática. O resultado desta análise é mostrado na tabela 12 a seguir.

Modelo: $P1=(P2^{b2})*(P3^{b3})*(P4^{b4})*(P5^{b5})*(P6^{b6})*(P7^{b7})*(P8^{b8})$				variável dependente : P1	
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F-valor	p-valor
Regressão	55,47215	6,0000	9,245359	1032,908	0,00
Resíduo	3,88465	434,0000	0,008951		
Total	59,35680	440,0000			

TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO DE REGRESSÃO PARA VELOCIDADE

Na análise da variância testou-se a hipótese nula:

$H_0$ : os coeficientes das variáveis explicativas no modelo são nulos, o que condena o modelo;

contra a hipótese alternativa:

$H_1$ : os coeficientes não são nulos e conseqüentemente o modelo representa o fenômeno.

Deve-se lembrar que os testes “t” para verificação da significância de cada um dos expoentes  $b_2$  e  $b_4$  a  $b_8$  das variáveis explicativas na equação (5.3) indicaram que todos eles são estatisticamente significativos, conforme valores-p constantes na Tabela 11, mostrada anteriormente.

Considerando o modelo proposto pela regressão da equação (5.5) observou-se primeiramente o somatório dos quadrados (SQ), os 6 graus de liberdade do modelo e a média dos quadrados, apresentados na terceira linha da tabela 12. Da mesma forma tem-se o correspondente para os resíduos, mas com 434 graus de liberdade. Na penúltima coluna apresenta-se o F-valor, que é o quociente entre a média dos quadrados e a média dos resíduos. Este valor será então comparado com a distribuição F de Fischer em um teste de hipóteses, considerando uma significância “alfa” de 0,05, adotado como limítrofe. Na última coluna tem-se a significância do teste de hipóteses. Os resultados apresentam um F-valor elevado, acima do valor crítico da função densidade de probabilidade F para as condições da análise. Tem-se então o p-valor quase nulo, indicando que, pela análise de variância, pode-se rejeitar a hipótese  $H_0$  acima, os expoentes são não nulos e o modelo de regressão é mesmo não-linear.



A qualidade do ajuste é avaliada pelo coeficiente de correlação múltipla ao quadrado, ou seja,  $R^2$  que tem como expressão e valores:

$$R^2 = \frac{SQ_{regressão}}{SQ_{total}} = \frac{55,47215}{59,65581} = 0,9298$$

Esses números indicam que o modelo ajustado é de excelente qualidade pois explica 92,98% da variação, ficando para o resíduo apenas 7,02%. O relacionamento entre a variável resposta P1 e as variáveis explicativas P2 e P4 a P8 é medido pelo coeficiente de correlação  $R=0,96426$ , mostrando, com este valor, que a variável resposta tem forte associação com as variáveis explicativas.

### 5.3.2 Modelo de regressão para o campo de diâmetros de gotículas

Da mesma forma procedeu-se o levantamento das regressões para o modelo do campo de diâmetro de gotículas. A variável resposta neste caso foi P3, ou seja, a razão entre o diâmetro da gotícula e o diâmetro da descarga do injetor  $d_g/d_0$ . Igualmente, a primeira análise referiu-se a escolha da equação de cálculo da espessura do filme na descarga  $t_0$ , explicitado a seguir.

#### 5.3.2.1 Escolha da equação para cálculo de $t_0$ para o campo de diâmetros

Foram processados os dados do banco respectivamente com cada proposta de cálculo de  $t_0$ . Os expoentes a determinar, desta feita foram  $c_2$  e de  $c_4$  a  $c_8$ . A equação utilizada para tal foi a 5.4, reproduzida abaixo.

$$P3 = 1 \cdot (P2)^{c_2} \cdot (P4)^{c_4} \cdot (P5)^{c_5} \cdot (P6)^{c_6} \cdot (P7)^{c_7} \cdot (P8)^{c_8}$$

A tabela 13, à seguir, apresenta os resultados comparativos das correlações com as quatro propostas.

Diâmetros	Expoentes	Valor estimado pela regressão	Erro Standard	t-valor	p-valor	Limite inferior estimado (alfa=0,05)	Limite inferior estimado (alfa=0,05)
Simmons& Harding $R^2=0,9354$	c2	0.287682	0.044912	6.4055	0.000000	0.199415	0.375948
	c4	0.280809	0.077399	3.6281	0.000319	0.128695	0.432923
	c5	0.260518	0.127956	2.0360	0.042344	0.009043	0.511993
	c6	-0.125624	0.016001	-7.8512	0.000000	-0.157071	-0.094178
	c7	-0.175047	0.016579	-10.5586	0.000000	-0.207630	-0.142465
	c8	0.655797	0.037585	17.4485	0.000000	0.581931	0.729663
<b>Risk &amp; Lefebvre</b> $R^2=0,9456$	<b>c2</b>	<b>-0.21520</b>	0.066976	-3.2131	0.001411	-0.34684	-0.08356
	<b>c4</b>	<b>0.32532</b>	0.070942	4.5858	0.000006	0.18589	0.46476
	<b>c5</b>	<b>-1.32789</b>	0.150021	-8.8514	0.000000	-1.62275	-1.03304
	<b>c6</b>	<b>-0.46838</b>	0.042858	-10.9287	0.000000	-0.55262	-0.38415
	<b>c7</b>	<b>-0.19837</b>	0.013567	-14.6212	0.000000	-0.22504	-0.17170
	<b>c8</b>	<b>0.65433</b>	0.034167	19.1509	0.000000	0.58718	0.72149
Griffen& Muraszew $R^2=0,9312$	c2	0.49212	0.057595	8.5444	0.000000	0.37893	0.605303
	c4	0.12359	0.074744	1.6536	0.098910	-0.02329	0.270481
	c5	-1.02212	0.154377	-6.6210	0.000000	-1.32550	-0.718737
	c6	-0.06160	0.014919	-4.1289	0.000043	-0.09092	-0.032280
	c7	-0.21766	0.016581	-13.1272	0.000000	-0.25025	-0.185079
	c8	0.63728	0.037973	16.7827	0.000000	0.56266	0.711909
Griffen&Risk $R^2=0,9432$	c2	0.51904	0.054057	9.6016	0.000000	0.41280	0.625278
	c4	0.20816	0.067560	3.0812	0.002189	0.07539	0.340937
	c5	-1.23229	0.156134	-7.8925	0.000000	-1.53914	-0.925446
	c6	-0.09736	0.013769	-7.0706	0.000000	-0.12442	-0.070297
	c7	-0.22605	0.014864	-15.2078	0.000000	-0.25526	-0.196834
	c8	0.68990	0.034487	20.0046	0.000000	0.62213	0.757682

TABELA 13 – RESUMO COMPARATIVO DOS MODELOS PARA O CAMPO DE DIÂMETROS SEGUNDO VARIAS PROPOSTAS DE CALCULO DE  $t_0$

Avaliando-se os resultados e considerando o critério do coeficiente de determinação múltiplo “ $R^2$ ” tem-se que as propostas de melhor desempenho foram a de Griffen e Risk e a de Risk e Lefebvre (RL), com diferença marginal. Neste caso e considerando os modelos de melhor desempenho para ambas as regressões, optou-se pelo aprofundamento dos estudos segundo a proposta de Risk e Lefebvre.

Fazendo uma análise de variância do modelo de regressão segundo Risk e Lefebvre pode-se observar que todos os expoentes propostos são significativos. O maior “p-valor” é de 0,0014 para o expoente c2, mas ainda bem inferior ao nível de significância “alfa” de corte, adotado como 0,05 ou 5%.

### 5.3.2.2 O Modelo

Com a escolha da proposta de Rizk e Lefebvre também para o modelo do campo de diâmetros de gotículas pode-se então apresentar a equação (5.6) abaixo.

$$\frac{d_g}{d_0} = \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{-0,2152} \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^{0,3253} \cdot Eu^{-1,3279} \cdot Re^{-0,4684} \cdot We^{-0,1984} \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^{0,6543} \quad (5.6)$$

### 5.3.2.3 Análise do modelo de regressão obtido para o campo de diâmetros

Da mesma forma da análise para o modelo do campo de velocidades pode-se comentar sobre a regressão para os diâmetros. Na figura 42 apresentam-se os resultados entre os valores preditos e os observados nos ensaios. Igualmente observa-se forte coerência entre os valores.

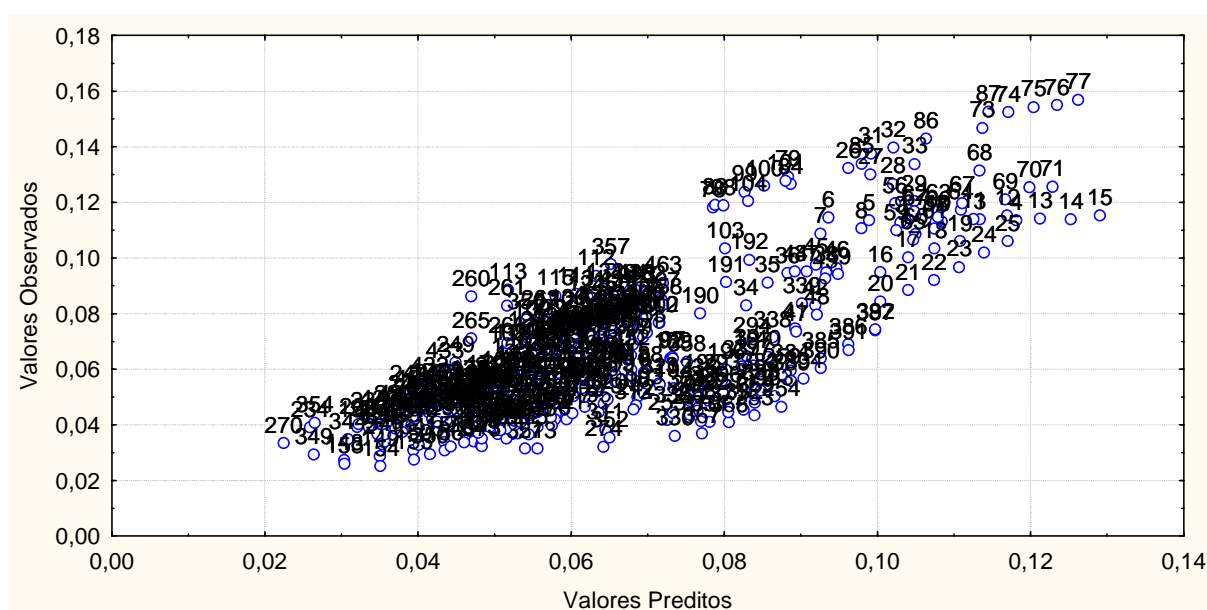


FIGURA 42 – CORRELAÇÃO ENTRE VALORES PREDITOS E OBSERVADOS REGRESSÃO NÃO-LINEAR PARA DIÂMETROS, EQUAÇÃO R&L (os algarismos sobre os pontos indicam número do ensaio)

Na figura 43, por sua vez, pode-se observar a distribuição dos resíduos, também indicando ruídos inerentes a experimentação científica.

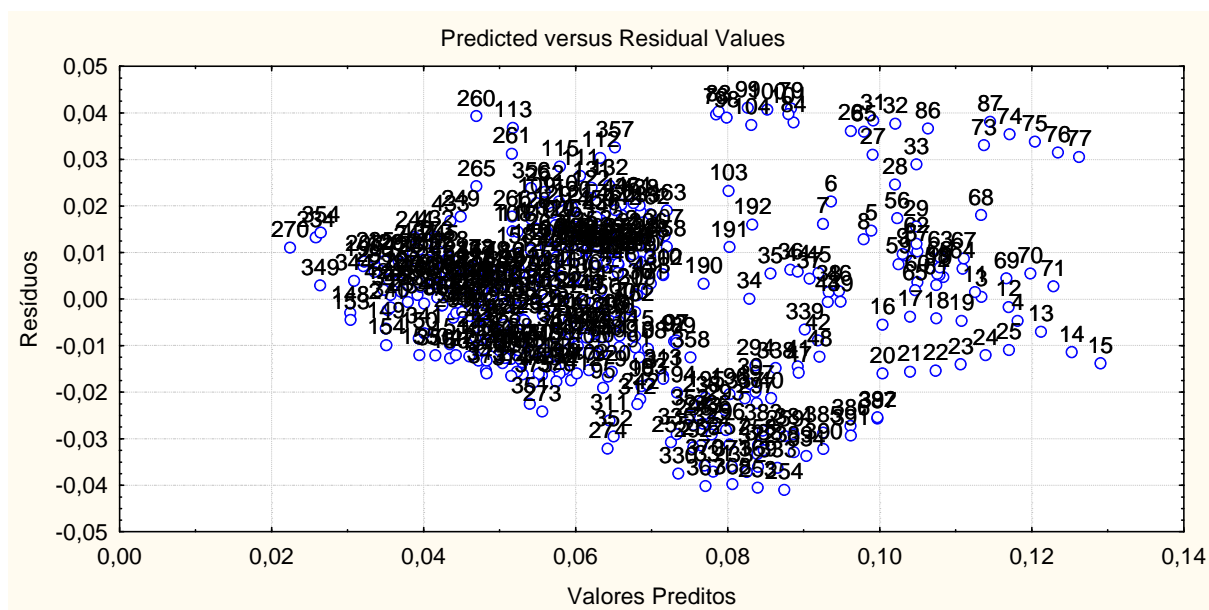


FIGURA 43 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS DOS VALORES PREDITOS -REGRESSÃO NÃO-LINEAR PARA DIÂMETROS

A uniformidade de distribuição dos resíduos se confirma na figura 44 em que se observa um perfil bem próximo ao Gaussiano.

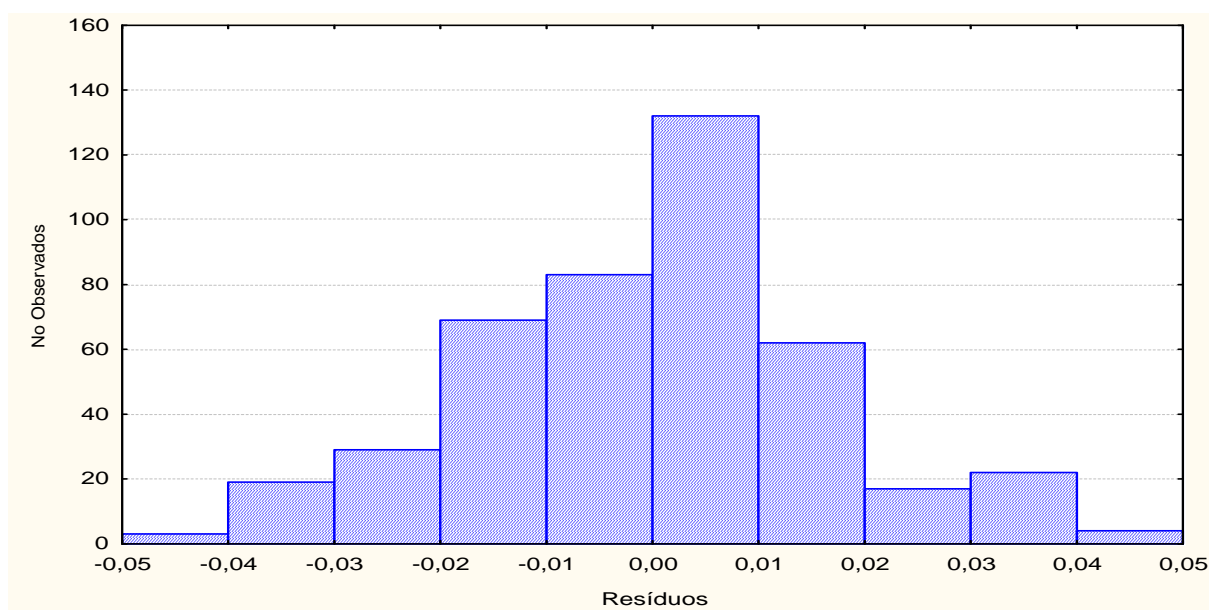


FIGURA 44 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DOS RESÍDUOS ENTRE VALORES PREDITOS E MEDIDOS

Finalmente o modelo de regressão para o campo de diâmetros foi submetido também a uma análise de variância. A tabela 14 abaixo apresenta os resultados para o modelo sendo P3 a variável dependente.

Modelo: $P3=(P1^0)*(P2^{b2})*(P4^{b4})*(P5^{b5})*(P6^{b6})*(P7^{b7})*(P8^{b8})$				variável dependente : P3	
	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F-valor	p-valor
Regressão	2,155376	6,0000	0,359229	1258,424	0,00
Resíduo	0,123889	434,0000	0,000285		
Total	2,279265	440,0000			

TABELA 14 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO DE REGRESSÃO PARA DIÂMETROS

A exemplo do apresentado para o modelo do campo de velocidades, mostrado no item 5.3.1.3, a análise indica que o modelo tem significância estatística no que se refere a variâncias. O p-valor próximo da nulidade revela que, pela análise de variância, o modelo de regressão tem expoentes não nulos, a exemplo do modelo de velocidades.

A qualidade do ajuste é avaliada pelo coeficiente de correlação múltipla ao quadrado:

$$R^2 = \frac{SQ_{regressão}}{SQ_{total}} = \frac{2,15537}{2,279265} = 0,9456$$

Esses números indicam que o modelo ajustado para o campo de diâmetros também tem excelente qualidade, pois explica 94,56% da variação, ficando para o resíduo apenas 5,4 %. O relacionamento entre a variável resposta P3 e as variáveis explicativas P2 e P4 a P8 é medido pelo coeficiente de correlação  $R=0,9724$ , mostrando, com este valor, que a variável resposta tem forte associação com as variáveis explicativas.

#### 5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO PARA O CAMPO DE VELOCIDADES

Com o modelo de regressão eleito pela avaliação estatística foi possível verificar a eficácia das predições para velocidades. Para tal foram feitos ensaios de

validação variando-se o líquido e as condições operacionais. Para a predição da velocidade foi utilizada a equação (5.5). Foram utilizados os mesmos fluidos dos ensaios do desenvolvimento da correlação. Os resultados, apresentados na tabela 15, mostraram erros percentuais inferiores a 20%.

Ensaio	Medidos	Preditos	Erro %
A	13,31	14,12	6,10
B	7,03	7,90	12,36
C	13,83	15,67	13,32
D	12,22	9,92	18,82
E	13,78	16,32	18,37

TABELA 15 – VALIDAÇÃO DE ENSAIOS ; VELOCIDADES (m/s)

## 5.5 VALIDAÇÃO DO MODELO PARA O CAMPO DE DIÂMETROS

Da mesma forma foram realizados ensaios para a verificação da eficácia do modelo de regressão para o campo de diâmetros. A tabela 16 apresenta os valores preditos, os efetivamente medidos e o erro percentual.

Ensaio	Medidos	Preditos	Erro %
A	66,3E-6	70,3E-6	6,11
B	30,4E-6	36,1E-6	18,88
C	30,4E-6	31,4E-6	3,27
D	19,8E-6	21,8E-6	9,79
E	30,5E-6	34,2E-6	11,95

TABELA 16 – VALIDAÇÃO DE ENSAIOS ; DIÂMETROS (m)

## 6 CONCLUSÕES

Considerando os resultados deste trabalho sobre atomizadores do tipo mecânico – centrífugo, utilizados em injetores de motores, pode-se finalmente lograr os modelos de predição apresentados pelas equações (5.5) e (5.6), transcritos a seguir:

$$\frac{U_g}{U_0} = \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{-0,5836} \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^{-0,5077} \cdot Eu^{-0,4819} \cdot Re^{-0,2077} \cdot We^{-0,2953} \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^{0,4239}$$

$$\frac{d_g}{d_0} = \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{-0,2152} \cdot \left( \frac{z}{d_0} \right)^{0,3253} \cdot Eu^{-1,3279} \cdot Re^{-0,4684} \cdot We^{-0,1984} \cdot \left( \frac{\theta_g}{\theta} \right)^{0,6543}$$

As faixas dos adimensionais cobertos por este estudo foram: número de Euler  $Eu$  de 0,766 até 3,178, número de Reynolds  $Re$  de 879 até 46319 e número de Weber de 0,915 a 60,63.

Os experimentos foram realizados com auxílio de métodos não intrusivos de investigação de sprays, por interferometria de efeito Doppler em luz laser. Os modelos de regressão extraídos do banco de dados apresentaram significância estatística aceitável na engenharia e coeficientes de regressão múltipla plenamente satisfatórios. Além disso, os ensaios de validação mostraram forte coerência entre os valores de velocidade e diâmetro preditos quando comparados com medições efetivas.

Para o cálculo da espessura da lâmina de líquido “ $t_0$ ” no orifício de descarga, foram avaliadas as quatro equações mais praticadas segundo a literatura, discutidas no item 4.4.7. O modelo de cálculo de melhor desempenho estatístico foi a equação (4.30) de Risk e Lefebvre, transcrita abaixo:

$$t_0 = 2,7 \cdot \left[ \frac{d_0 \cdot F_N \cdot \mu_L}{\sqrt{\Delta P_L \cdot \rho_L}} \right]^{0,25}$$

Os resultados obtidos permitem afirmar que os modelos de correlação apresentados têm importância como estimadores e explicam o fenômeno. As ferramentas de predição são efetivas para uso, seja para simulações ou melhoria dos dispositivos. Os resultados permitem afirmar que esta TESE, dessa forma, confirma a HIPÓTESE mencionada no item 2.5.



## 7 SUGESTÕES

Os trabalhos desenvolvidos e apresentados nesta TESE focaram correlações empíricas para as velocidades e diâmetro de gotículas. Como descrito nos capítulos 2 e 3, a área de atomização é vasta e oferece excelentes oportunidades de pesquisa e desenvolvimento. A seguir são apresentadas sugestões para a continuação de estudos aproveitando-se as contribuições desse trabalho, não somente pelas correlações finais, mas também quanto à metodologia empregada.

Para tal pode-se classificar as oportunidades em duas grandes áreas de pesquisa como a atomização propriamente dita e a conversão de combustíveis líquidos.

### 7.1 ESTUDOS NA ÁREA DE ATOMIZAÇÃO

Na área de atomização, entretanto, existem oportunidades de continuação desse trabalho que em muito podem contribuir para o aprofundamento de conhecimentos. Pose-se relacionas algumas dessas oportunidades como se seguem:

- verificação das curvas de decaimento do diâmetro de gotículas, a jusante da região estudada, e identificação das zonas em que a vaporização do fluido atomizado torna-se importante;
- idem para a transferência de quantidade de movimento entre as gotículas e o gás (ar) do entorno;
- aperfeiçoamento do injetor visando o controle de um determinado parâmetro, como a velocidade por exemplo;
- estudos voltados a geometria do injetor, especialmente a seção de centrifugação (raiamento), imediatamente à montante do orifício de descarga;

## 7.2 ESTUDOS NA ÁREA DE COMBUSTÃO

Da mesma forma, a metodologia utilizada e os resultados observados podem permitir o aprofundamento de pesquisa na zona de ignição de mistura carburada. Nessa área o campo é igualmente vasto, a saber:

- verificação da transferência de massa das gotículas para o meio (ar) por difusão e por convecção considerando a quantidade de movimento dos corpúsculos;
- simulação da mistura carburada quanto as reações de combustão em fluxo bifásico, o que ocorre em grande número de máquinas térmicas e fornalhas como caldeiras e fornos;
- estudos de correlação entre as características do spray, principalmente as oferecidas por este trabalho, na geração de poluentes como material particulado orgânico em fornalhas de caldeiras e fornos;
- complementação de simuladores de motores de combustão interna (MCI's) como módulo de geração do spray;

## REFERÊNCIAS

- ALKIDAS, A. C. Combustion advancements in gasoline engines. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 11, p. 2751-2761, Nov. 2007.
- BACHALO, W. D. **Method for Measuring the size and velocity of Spheres by Dual- beam Light –Scatter Interferometry**. Applied Optics, vol. 19, No. 3, pp. 363-370, February 1, 1980
- BALAT, M., BALAT, H. **Recent Trends in Global Production and Utilization of Bio-Ethanol Fuel**; Applied Energy 86, pp 2273-2282; April, 2009
- BARBETA, P.A et al. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. São Paulo, ATLAS, 2004.
- BARROS, B. et al. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas, Editora da Unicamp, 2003.
- BIRCH, S. Technical brief: fuel injection, the inside story. **Automotive Engineering International On Line**, Warrendale, Jun. 2000. Disponível em: <[http://www.sae.org/automag/techbriefs\\_06-00/04.htm](http://www.sae.org/automag/techbriefs_06-00/04.htm)>. Acesso em: 10 set. 2006.
- CHIGIER, N. Recent advances in spray science. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIQUID ATOMIZATION AND SPRAYS, 9., 2003, Sorrento, Italy.
- CHRYSSAKIS, C. A. et al. **Fuel spray simulation of high-pressure swirl-injector for DISI engines and comparison with laser diagnostic measurements**. Michigan: University of Michigan, 2003. Disponível em: <[http://me.engin.umich.edu/autolab/Publications/Adobe/P2003\\_01.PDF](http://me.engin.umich.edu/autolab/Publications/Adobe/P2003_01.PDF)>. Acesso em: 10 set. 2006.
- CHOI, J.; Lee, S.; Bae, C. Spray and flow-field interaction of gasoline direct injection. **Atomization and Sprays**, v. 14, pp.159-174, 2004
- DESANTES, J. M. et al. Experimental characterization of internal nozzle flow and diesel spray behavior. **Atomization and Sprays**, v.15, n. 5, p. 517-544, 2005. (Evaporative conditions, part. II).
- DORFNER, V. et al. "Viscosity and Surface Tension Effects in Pressure Swirl Atomization", **Atomization and Sprays**, vol. 5, p. 261-285, 1995.
- DRAKE, M. C.; HAWORTH, D. C. Advanced gasoline engine development using optical diagnostics and numerical modeling. **Proceedings of the Combustion Institute**, p. 99-124, Oct. 2007.
- FEIKEMA, D. A. Liquid film characteristics inside a pressure-swirl atomizer. In: JOINT PROPULSION CONFERENCE AND EXHIBIT, 34., 1998, Cleveland. **Proceedings of Atomization Conference**. Reston: AIAA, 1998.

FERRARA, M. Carburetors vs. Fuel Injection: Technology Gets the Better of a Die-Hard Carburetor Enthusiast; **Revista DSPORT MAGAZINE**, n. 59, Nov. 2007

FOX, W. R.; McDONALD, T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1995.

HISTÓRIA do carburador: ele era a única forma de alimentar o motor de um veículo. **Jornal Oficina Brasil**, São Paulo, n. 198, ago. 2007. Disponível em: <<http://www.oficinabrasil.com/noticias/index.asp?COD=2848>>. Acesso em: 20 set. 2007.

IYER, V.; ABRAHAM, J. Two-fluid modeling of spray penetration and dispersion under diesel engine conditions. **Atomization and Sprays**, v. 15, n. 3, p. 249-270, 2005.

JAE, J. C.; SEOKHWAN, L. Spray and flow-field interaction of gasoline direct injection. **Atomization and Sprays**, v. 14, n. 2, p. 159-174, 2004.

JONES, T. O. **Assessment of Technologies for Improving Light-Duty Vehicle Fuel Economy**, National Research Council, 2008.

KUFFERATH, A.; WEND, B.; LEUCKEL, W. Influence of liquid flow conditions on spray characteristics of internal-mixing twin-fluid atomizers. **International Journal of Heat and fluid flow**, v. 5, p. 513-519, Sept. 1999.

KUO, K. K. Y. **Principles of combustion**. 2nd. ed. New York: Wiley-Interscience, 2005.

LEE, K. H.; LEE, C. H. Characterization of the flow field and stratification effects of fuel spray in a visualization engine using DPIV and entropy analysis. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Philadelphia, v. 31, n. 6, p. 579-592, May 2007.

LEE, C.S.; Chon, M.S.; Park, Y. C.; Spray structure of high pressure gasoline injector in a gasoline direct injector engine. **International Journal of Automotive Technology**, vol.2, No.4, pp. 165-170, 2001.

LEFEBVRE, A. H. **Atomization and sprays**. London: Taylor & Francis, 1989. (Combustion: An International Series).

LEFEBVRE, A. H. Energy considerations in twin-fluid atomization. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 114, p. 89, Jan. 1992.

LEFEBVRE, A.H. **Introduction to atomizer and spray technology**. Manchester: University of Manchester-UMIST, 1996. (Notas do 10º curso de Atomizer & Spray Technology).

LENTINELLO, R. A. Mechanical engineering. **Motoring Madness**, n.122, p. 86-92, Nov. 2000.

MITRA, S; XIANGUO, LI. A predictive model for droplet size distribution in sprays. **Atomization and Sprays**, v. 9, p. 29-50, Nov.1999.

MUGELE, R.; EVANS, H. D. Droplet size distribution in sprays. **Ind.Eng.Chem.**, v. 43, n. 6, p. 1317-1324, 1951.

NABER, J. D.; SIEBERS, D. **Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays**. Detroit: SAE International, 1996. (Paper n. 960034).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Review of the research program of the partnership for a new generation of vehicles**. Washington: The National Academies Press, 1994.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Pioneira Thomson, 2003.

RAWLE, Alan. Basic principles of particle size analysis. **Tech Paper**, London, p. 1-8, 1992.

RICHARDS, D. J.; ALLENBY, B. R.; COMPTON, W. D. **Information systems and the environment**. Washington, DC: National Academy of Engineering, 2001.  
Disponível em:  
<[http://findarticles.com/p/articles/mi\\_qa5325/is\\_200205/ai\\_n21312297](http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5325/is_200205/ai_n21312297)>. Acesso em: 12 oct. 2006.

RICOU, F. P.; SPALDING, D. B. Measurements of entrainment by axisymetrical turbulent jets. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge, v. 11, p 21-32, 1961.

RINK, K. K.; LEFEBVRE, A. H. **Influence of fuel drop size and combustion operating conditions on pollutant emissions**. Detroit: SAE International, 1986. (Paper n. 861541).

ROISNAM, I. V.; TROPEA, C. Flux measurements in sprays using phase doppler technics. **Atomization and Sprays**, v. 11, p. 667-699, Nov. 2001.

ROTONDI, R.; BELLA, G. Gasoline direct injection spray simulation. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 45, n. 2, p. 168-179, 2006.

SAMOILOVITCH, G. S. **Hidro-gasodinâmica**. Moscou: Editora Construção de Máquinas, 1990.

SCHMIDT, P. et al. Pressure-swirl atomization in the near field. **SAE International**, Washington, DC, 1999. Disponível em:  
<<http://homepages.cae.wisc.edu/~rutland/research.dir/GDI.dir/SAE-1999-01-0496.pdf>>. Acesso em: 25 oct. 2006.

SHEN, J. Absolute and convective instability of annular viscous liquid jets in gas streams. **Atomization and Sprays**, v. 11, n. 5, p. 491, sep. 2001.

SHORT, R. Perfecting injection. **Super Chevy**, 2004. Disponível em:  
<[http://www.superchevy.com/technical/engines\\_drivetrain/induction\\_poweradders/0303sc\\_injection/index.html](http://www.superchevy.com/technical/engines_drivetrain/induction_poweradders/0303sc_injection/index.html)>. Acesso em: 3 oct. 2006.

SIK LEE, Chang; Reitz, Rolf D. Effect of liquid properties on the breakup mechanism of high-speed liquid drops. **Atomization and Sprays**, v. 11, n. 1, p. 1-19, 2001.

SIMMONS, H. C.; HARDING, C. F. Some effects of using water as a test fluid in fuel nozzle spray diagnostics. **Transactions of the ASME**, Nova Iorque, v. 103, Jan. 1981.

SOUZA, E. J. J. **Avaliação de regimes de fluxo compressível em dispositivos atomizadores de cargas líquidas**. 2002. Dissertação (Mestrado em Programa Interdisciplinar Pós Graduação Engenharia)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SOUZA, E. J. J. **Técnicas de avaliação de sprays**. Florianópolis: UFSC, 2007. Notas de curso ministrado na "Escola de Combustão".

SOUZA, E. J. J.; DUBOIS, A. M. Cost effective evaluation techniques for FCC atomizing nozzles. In: AMERICAN CHEMICAL SOCIETY- ACS SYMPOSIUM, 1998, Boston. **Anais...** Boston: ACS, 1998.

SOUZA, E. J. J.; VLASSOV, D.I.; PONTE, M.J.J.A. Evaluation of a twin-fluid atomizer for FCC feeding system with atomizing medium under transonic flow. In: ICLASS, Sorrento, Italy, 2003. **Anais...**

TATE, R. W. Some problems associated with the accurate representation of drop size distributions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIQUID ATOMIZATION AND SPRAYS, 2., 1982, Madison. **Proceedings...** Madison: ICLAS, 1982. p. 341-351.

TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1995. v. 1.

TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. v. 2.

UDRIAVTSEV, B. V. **Bases da teoria de cálculo de motores de foguete à combustível líquido**. Moscou: Escola Superior, 1975.

UIRCHOVITCH, T. X. **Jatos turbulentos em escoamento transversal**. Moscou: Construção de Máquinas, 1993.

VALLET, A.; BURLUKA, A. A.; BORGHI, R. Development of a Eulerian Model for the atomization of a liquid jet. **Atomization and Sprays**, v. 11, n. 6, p. 619-642, 2001.

VENKATRAMAN I.; ABRAHAN J. Two-fluid Modeling of Spray Penetration and Dispersion Under Diesel Engine Conditions; **Atomization and Sprays**; v. 15, n. 3, p. 249-270, 2005.

WALD, A. Contributions to the theory of statistical estimation and testing hypotheses. **Annals of Mathematical Statistics**, Philadelphia, v. 10, n. 4, p.299-

326, Dec. 1939. Disponível em: <<http://www.stat.yale.edu/~hz68/619/Wald-1939.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2008.

WALPOLE, R. E.; MAYERS, R. H. **Probability and Statistics for Engineers and Scientists**; 5<sup>th</sup> Ed. New York: MacMillan Publishing Co, 1993.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E. **Fundamentals of momentum, heat and mass transfer**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

WIGG, L. D. Drop size predictions for twin-fluid atomizers. **Journal Inst.Fuel**, v. 27, p. 500-505, 1964.

WIGG, L. D. **The effect of scale on fine sprays**. London: Large Airblast Atomizers, 1959. (National Gas Turbines Establishment, Pyestock, Report, 236).

XIANGUO LI; MEISHEN LI; HUIJUAN FU. Modeling the initial droplet size distribution in sprays based on the maximization of entropy generation. **Atomization and Sprays**, v. 15, n. 3, p. 295-321, 2005.

YULE, A. J. et al. **Introduction to atomizer and spray technology**. Manchester: University of Manchester-UMIST, 1996. (Notas do 10º curso de Atomizer & Spray Technology).

## GLOSSÁRIO

Atomização: processo constante de quebra de um fluxo líquido originariamente contínuo em gotas e gotículas

Atomizador: dispositivo com geometria definida capaz de gerar um spray

Atomizador duplo-fluido a ar assistido: atomizador do tipo duplo-fluido que utiliza um gás (ar ou outro) como fluido atomizador a pressões elevadas e com baixa vazão relativa ao líquido a ser atomizado.

Atomizador duplo-fluido: atomizador que emprega dois fluidos; aquele a ser atomizado e um auxiliar para a atomização

Atomizador duplo-fluido a ar soprado: atomizador do tipo duplo-fluido que utiliza um gás (ar ou outro) como fluido atomizador a pressões baixas e altas vazões relativas ao líquido a ser atomizado

Gota: porção de líquido de forma aproximadamente globular com diâmetro mínimo de 0,5 mm.

Gotícula: gota com diâmetro abaixo de 0,5 mm

Ligamento: porção de um líquido com quantidade de movimento, dotado de energia suficiente à ruptura da coesão entre suas moléculas pela superação da tensão superficial.

***SMD ou "Sauter Mean diameter": Diâmetro estatístico representativo de Sauter.*** O SMD é calculado sobre uma distribuição de diâmetros

$$SMD=D[3,2] = \left\{ \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 n(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^2 n(D) dD} \right\}$$

Spray: Conjunto de gotas e gotículas dotadas de quantidade de movimento.



## ANEXOS